

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA



**Determinación de Mecanismos Focales para las
réplicas del terremoto de Maule 2010 en la
Península de Arauco**

Ademar Fernández Salazar

Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico

Marzo 2018

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**Determinación de Mecanismos Focales para las
réplicas del terremoto de Maule 2010 en la
Península de Arauco**

Ademar Fernández Salazar

**Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico**

Profesor guía:
Dr. Matt Miller

Comisión:
Dr. Matt Miller - Dr. Rodrigo Abarca - Dr. Arturo Belmonte



Marzo 2018

Dedicatoria

A mi familia y amigos por nunca haber dudado de mí.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios y luego a mi profesor guía, el Dr. Matt Miller del Departamento de Geofísica UdeC, quien me dio la oportunidad de trabajar con él por primera vez en el marco de un tópicó el 1 de abril del 2016, además de proveerme siempre lo necesario (datos, artículos científicos, impresiones y ayuda teórica) para cada investigación. Confieso jamás haber pensado que aquel tópicó desembocaría en otro y ese otro terminaría siendo mi tesis.

También cabe agradecer el apoyo de colegas y académicos del DGEO que siempre estuvieron para calmar mis dudas; como el geofísico Felipe Vera, el licenciado en geofísica Enrique Carrasco, la Post-Doctorado Cindy Mora del DCG, entre otros. Por último, no puedo omitir el agradecer también a mis amigos Patricio Cerda y Fernando Gaete del departamento de Física por su ayuda en el manejo de Latex durante este documento y la duración de mi carrera.

Índice general

Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XVII
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	5
1.2. Objetivos	5
2. Marco teórico	7
2.1. Conceptos previos a las SMF	7
2.1.1. Falla geológica	7
2.1.2. Sismo	9
2.1.3. Ondas de cuerpo	9
2.1.4. Estación sismológica	10
2.1.5. Sismograma	10
2.1.6. Zona de subducción chilena	12
2.1.7. Gap sísmico	12
2.2. Parámetros necesarios para obtener SMF mediante FOCMEC	13
2.2.1. Estación (STA)	13
2.2.2. Azimuth (AZIN)	14
2.2.3. RATLOG	14
2.2.4. Ángulo de despegue o Take off Angle (TOANG y TOANG1)	14
2.2.5. Polaridad (SENSE)	15
2.3. Soluciones de Mecanismo Focal	16
2.3.1. Tensor de momento	16
2.3.2. Diagrama Beachball o Pelota de playa	16
2.3.3. Strike (Rumbo), Dip (Manteo) y Rake (Slip/Deslizamiento)	18
2.3.4. Tipos de mecanismos focales:	19

3. Zona de estudio	21
3.1. Península de Arauco	21
3.1.1. Antecedentes geológicos de la península de Arauco	22
3.1.2. Con respecto a Isla Santa María	25
3.1.3. En relación a la microplaca de Chiloé	26
4. Metodología	29
4.1. Base de datos	30
4.2. Picking	30
4.2.1. SAC: Seismic Analysis Code	33
4.3. Resultados del picking	33
4.4. Modelo de velocidades	34
4.4.1. TauP 2.4.1: Flexible Seismic Travel-Time and Raypath Utilities	36
4.5. Obtención de parámetros	36
4.5.1. Rotación de sismogramas	36
4.5.2. Valores de RATLOG	38
4.6. Archivo de input para FOCMEC	38
4.7. Ingreso del input en FOCMEC	41
4.8. Soluciones y calidad asociada	41
4.9. Gráfica en GMT	42
4.9.1. Diagramas para eliminar y conservar estaciones	44
5. Resultados	45
5.1. Primeros resultados	45
5.2. Soluciones de Mecanismo Focal para la zona de estudio	48
5.2.1. Grupo 1: Eventos superficiales con profundidad ≤ 9 km	49
5.2.2. Grupo 2: Eventos entre 125 y 142 km de la fosa (menor profundidad)	53
5.2.3. Grupo 3: Eventos con distancia a la fosa ≈ 100 km (mayor profundidad)	55
5.2.4. Grupo 4: Eventos a más de 155 km de la fosa (probablemente sobre el slab)	57
5.2.5. Grupo 5: Eventos con profundidad ≥ 50 km	59
6. Discusión y conclusiones	63
6.1. Discusión	63
6.2. Conclusiones	64
7. Anexo	71
7.1. picking_ultimate.sh	71
7.1.1. Código del ejecutable	72
7.2. ORDENAR_HPF.sh	74
7.2.1. Código del ejecutable	74
7.3. parametros.sh	75
7.3.1. Código del ejecutable	75
7.3.2. Función sphere.awk	78

7.4.	rotate_gcp.sh	78
7.4.1.	Código del ejecutable	78
7.5.	RATLOG_VHS.sh	80
7.5.1.	Código del ejecutable	80
7.6.	input_create.sh	82
7.6.1.	Código del ejecutable	83
7.7.	focmec_run.sh	85
7.7.1.	Código del ejecutable	85
7.8.	six_plot_foc_mec.sh	87
7.8.1.	Código del ejecutable	87

Índice de figuras

1.1. Zona de estudio. En círculos aparece la distribución de eventos localizados mediante VELEST (Kissling et al., 1994) gracias a los datos de estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos) y a la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), con su respectiva paleta de colores referente a profundidad. Se aprecia también la fosa graficada paralela al arco volcánico, el cual aparece señalado con triángulos rojos (la zona de Fractura de Mocha (MFZ) está extraída del trabajo de Lange et al., 2012).	2
1.2. Perfil de los eventos destacados en la figura anterior para mostrar su relación de profundidad con respecto a la distancia de la fosa. Localizaciones mediante VELEST (Kissling et al., 1994) hechas por Azúa, 2017.	2
1.3. Límites de las áreas de rupturas de los terremotos de Valdivia 1960 $M_w = 9,5$ (inferior en azul) y Maule 2010 $M_w = 8,8$ (superior en violeta). Se aprecia como gran parte de la península de Arauco no forma parte de aquellas rupturas. Imagen extraída del trabajo de Hicks et Rietbrock, 2015.	4
2.1. Mecánica de las fallas geológicas. Las imágenes permiten apreciar el deslizamiento de los bloques de piso y techo en cada caso (Enciclopedia Británica, 1994).	7
2.2. Fotografía aérea de la falla de San Andrés, al sur de California, la cual marca la delimitación entre la placa Norteamericana y la placa Pacífica (fotografía extraída de la web http://www.amusingplanet.com/2015/03/the-san-andreas-fault-of-california.html).	8
2.3. Diagrama de ocurrencia de un evento sísmico, mostrando el foco de ruptura (hipocentro) y su proyección a la superficie (epicentro). Imagen extraída de la web http://licenpedia.wikispaces.com/RELIEF	9

2.4.	Diagrama de propagación de las ondas de cuerpo. Se aprecia el movimiento compresional/dilatacional de la onda P y al mismo tiempo el movimiento transversal de la onda S, manteniendo ambas la misma dirección de propagación. Imagen de la web https://byjus.com/physics/p-wave/ .	9
2.5.	Sismograma de un evento registrado por la estación QC04 el jueves 9 de septiembre del 2010 a las 05:46 de la madrugada. Debido al ruido ambiental, las llegadas de onda P (IPD1) y S (IS-1) señaladas no son de la mejor calidad (por eso finalizan en 1). De arriba hacia abajo se aprecian las componentes Este/Oeste (HHE), Norte/Sur (HHN) y vertical (HHZ). Finalmente destacamos que las amplitudes alcanzadas por cada registro están en cuentas digitales.	11
2.6.	Esquema general de la zona de subducción chilena. A la izquierda se tiene la placa de Nazca y a la derecha la placa Sudamericana. Los círculos verdes representan sismos y como era de esperar, en la zona sismogénica (zona de contacto pleno entre placas, estimada entre 10 y 40 km de profundidad) es donde se tiene la mayor cantidad de registro sísmico (esquema extraído del trabajo de Klingelhoefer et al., 2010).	12
2.7.	Esquema post terremoto del Maule 2010 que muestra los segmentos de rupturas de terremotos históricos en la zona centro sur de Chile. Se aprecia que el segmento de Concepción no presentaba registros desde 1835, por lo que era caracterizado como Gap Sísmico. La zona de estudio señalada en el mapa de la derecha no corresponde a la zona tratada en este documento, puesto que el esquema ha sido extraído del trabajo de Moernaut, 2010.	13
2.8.	Famoso esquema de Stein y Wyssession, 2003. Detalla de manera gráfica el parámetro i_n , correspondiente al ángulo de despegue para un número n de estaciones sísmicas que registraron el evento.	14
2.9.	SMF extraída del trabajo de Ozacar y Beck, 2004. Basándose en las polaridades entregadas por las estaciones señaladas, se ha ajustado una solución de mecanismo focal, dejando las polaridades hacia arriba en la parte colorida de la solución y las polaridades que bajan en la parte en blanco. La solución obtenida es de tipo strike-slip (puede haber mostrado un mecanismo focal propio de esta investigación con sus respectivas polaridades, pero aquella representación es bastante conocida y fácil de comprender).	15
2.10.	Diagrama de un mecanismo focal de tipo strike-slip. Desde (a) puede apreciarse el diseño típico, mientras en (b) se enseña el patrón de radiación; asociando siempre una fuente a la sección colorida y un sumidero a la sección en blanco. A propósito del plano de falla asociada, (c) y (d) muestran las potenciales orientaciones.	16
2.11.	Gráficas para poder visualizar: (a) el ángulo de 90° entre el rumbo y el manteo; (b) Plano de falla adjudicado a un mecanismo focal de tipo strike-slip dextral, decidido bajo argumentos geológicos de su zona de estudio.	17

2.12. Diagrama donde se pueden apreciar los diferentes ángulos correspondientes al movimiento de un bloque con respecto a otro (pensándolo como si fueran fallas). \hat{n} es el vector normal al plano de falla, ϕ_f corresponde al ángulo del rumbo, δ es el ángulo de manteo, \hat{d} es el vector de deslizamiento y λ corresponde al ángulo de deslizamiento. Todos los ángulos medidos en grados (diagrama extraído del trabajo de Stein y Wysession, 2003). 18

2.13. Principales mecanismos focales unidos por una flecha con su respectiva falla asociada. De izquierda a derecha, tenemos mecanismos strike-slip, normal, inverso y oblicuo, siendo este último combinación de otros dos. Imagen por cortesía del Instituto de Geociencias de la Universidad Complutense de Madrid, recuperado de: <http://www.igeo.ucm-csic.es/mobile/es/igeo/noticias/186-igeoquiz-terremoto-de-ja%C3%A9n>. 19

3.1. Mapa geológico de la región de Arauco-Nahuelbuta, donde pueden apreciarse las fallas de Mocha-Villarrica, Lanalhue, Morguilla y Santa María con sus respectivas orientaciones (Melnick et al., 2009). 24

3.2. Mapa geológico y geomórfico de la Isla Santa María y su edad estructural estimada mediante el método de C^{14} para datación (extraída del trabajo de Melnick et al., 2006a). 26

3.3. Desacoplamiento del bloque de Chiloé a lo largo de LOFZ, gatillado por la subducción presente en el punto triple de Chile y la convergencia oblicua de placas. Se señala con una flecha la dirección de desplazamiento del bloque, que origina el domo en Nahuelbuta y da lugar al alzamiento de la zona (Melnick et al., 2009). 28

4.1. De abajo hacia arriba: Canal vertical (HHZ) y canales horizontales (HHN y HHE) del registro de un sismo el día 11 de septiembre del 2010 a las 08:10 de la mañana por la estación L006. Por el ruido ambiental registrado es imposible marcar manualmente las llegadas tanto de la onda P como de S. Recordar que aún existiendo la posibilidad de notar las llegadas al aplicar un filtro, aquellas polaridades no serían de fiar y por lo tanto no consideraremos series de tiempo filtradas. 31

4.2. De abajo hacia arriba: Canal vertical (BHZ) y canales horizontales (BHN y BHE) del registro de un sismo el día 11 de septiembre del 2010 a las 08:10 de la mañana por la estación LA1P (OBS). Se distingue de buena forma la llegada de onda S en el canal Norte/Sur (BHN), sin embargo es imposible obtener una llegada P de calidad 0. Los datos de esta estación serán rechazados más adelante para obtener la SMF por no cumplir con la calidad requerida para la onda P. 32

- 4.3. De abajo hacia arriba: Canal vertical (HHZ) y canales horizontales (HHN y HHE) del registro de un sismo el día 11 de septiembre del 2010 a las 08:10 de la mañana por la estación L104. Mediante un zoom es posible notar fiablemente la llegada de onda P, que tiene un comportamiento emergente con tendencia hacia abajo (EPD0). La llegada S está marcada con calidad 1 ($\pm 0,2$ segundos de error asociado al marcador), sin embargo por no trabajar con polaridades S será considerada de todos modos para la SMF. 32
- 4.4. Canales verticales asociados al sismo del 11 de septiembre del 2010 a las 08:10 de la mañana registrado por las estaciones LA1P, LA09 y LA08 (de abajo hacia arriba). Al haber seleccionado la estación LA1P, se ha guardado en un archivo de salida su información asociada, la cual se denota en la esquina superior izquierda de la figura. Notar que la diferencia temporal en llegadas P de las series de tiempo de las estaciones LA1P y LA09 (el equipo LA08 no presenta buenas condiciones de funcionamiento, por eso no se considera) se debe a la diferencia de distancia entre la localización del sismo y las estaciones en particular. 33
- 4.5. Gráfica del modelo utilizado en este estudio (obtenido a partir de modificaciones en la tomografía de Hicks et al., 2014). En (a), (b) y (c) puede apreciarse la variación con respecto a la profundidad presentada por los parámetros v_p , v_s y la tasa v_p/v_s respectivamente. 34
- 4.6. Se muestran los modelos de velocidades asociados a la zona de estudio según el trabajo de Hicks et al., 2014. A la izquierda, centro y derecha: Variaciones de v_p , v_s y v_p/v_s con profundidad, respectivamente (línea continua roja). La línea negra en cada gráfica representa el modelo 1-D obtenido por Haberland et al., 2006 y está ahí por efectos de comparación. 35
- 4.7. Visualización esquemática de la transformación de canales horizontales hacia radial y transversal, conservando el canal vertical. En (a): ϕ corresponde al ángulo entre el eje radial y el norte, siendo el canal transversal ortogonal al radial. En (b): puede apreciarse el esquema de la Tierra para entender el concepto de GCP (Great Circle Path); el eje radial es el que sigue el camino de los *aviones al volar por el planeta* y se aplica la regla de la mano derecha para encontrar el eje transversal que está implícito en esta figura. Esquemas extraídos del trabajo de Ammon, 2001. 37
- 4.8. Input de FOCMEC para una réplica asociada al terremoto de La Araucanía (2 de enero del 2011), siendo aquella réplica registrada a las 23:43 horas del mismo día del movimiento telúrico. Se aprecian 4 filas de datos por cada estación, producto del parámetro RATLOG que requiere una fila asociada a la polaridad del primer movimiento (sin RATLOG) y tres siguientes filas asociadas a los valores de RATLOG en V, H y S. Fue imposible pickear la llegada S en los registros de la estación L101, por eso no tiene RATLOG aunque presente *Take-off Angle* de onda S. 40

4.9. Archivo de salida (.out) desde FOCMEC correspondiente a la réplica del terremoto de La Araucanía mencionada en la figura 4.8. Desde abajo hacia arriba, la 8^{va} columna corresponde al RMS asociado a la cantidad de RATLOG permitidos por cada solución (7^{ma} columna). El mínimo valor de la 8^{va} columna decidirá la solución con que nos quedaremos (*Dip, Strike, Rake*), tomando en cuenta que los valores no aparecen ordenados de menor a mayor; esta vez fue sólo casualidad. 42

4.10. Gráfica de las 6 mejores soluciones (estando la mejor solución en la esquina superior derecha) de mecanismo focal entregadas por FOCMEC para un sismo registrado el 3 de enero del 2011 a las 13:49 horas (evento 2011003134955 sin errores de polaridad permitidos). Se entiende que es un mecanismo oblicuo con componente inversa. Esta figura es para mostrar como se comparó gráficamente las 6 mejores soluciones entregadas por FOCMEC para un evento basándose en los menores valores de RMS asociados a las tasas de amplitudes ingresadas. 43

4.11. La figura (a) corresponde al evento 2010253092832 con el picking inicial, sin cuidados de polaridades en primeras llegadas P; esto alude al caso 1 mencionado en esta sección y de este modo es imposible dibujar una SMF sobre aquel círculo. Por otra parte, la figura (b) corresponde al evento 2011021102516 y es fácil ver que debemos corregir la polaridad de la estación L101 (o bien quitarla del análisis de este evento) por salirse de la zona *up* (\uparrow) según la posición de las estaciones con respecto al sismo. 44

5.1. Mapa de las primeras 43 soluciones obtenidas de manera automática de un total de 505 eventos (sin revisión de picking) mediante la automatización del ingreso de parámetros y extracción de soluciones desde FOCMEC. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. 48

5.2. Localizaciones de las 32 soluciones finales de mecanismo focal producto del *re-picking* de los 58 eventos de características particulares. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. 49

5.3. Localizaciones de las 12 soluciones finales de mecanismo focal producto del *re-picking* de los 19 eventos del grupo. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. Las líneas continuas representan las localizaciones aproximadas de las fallas de Lanalhue (LFZ), Morguilla (MFZ) y Mocha-Villarrica (MVFZ) basadas en el mapa geológico de la figura 3.1 perteneciente al trabajo de Melnick et al., 2009. 51

5.4. Diagramas <i>beachball</i> para eventos 1 al 3 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	51
5.5. Diagramas <i>beachball</i> para eventos 4 al 6 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	52
5.6. Diagramas <i>beachball</i> para eventos 7 al 9 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	52
5.7. Diagramas <i>beachball</i> para eventos 10 al 12 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	52
5.8. Localizaciones de las 4 soluciones finales de mecanismo focal producto del <i>re-picking</i> de los 10 eventos del grupo. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. Las líneas continuas representan las localizaciones aproximadas de las fallas de Lanalhue (LFZ), Morguilla (MFZ) y Mocha-Villarrica (MVFZ) basadas en el mapa geológico de la figura 3.1 perteneciente al trabajo de Melnick et al., 2009.	54
5.9. Diagramas <i>beachball</i> para eventos 1 al 3 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	54
5.10. Diagrama <i>beachball</i> del evento 4 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	55
5.11. Localizaciones de las 5 soluciones finales de mecanismo focal producto del <i>re-picking</i> de los 8 eventos del grupo. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. Las líneas continuas representan las localizaciones aproximadas de las fallas de Lanalhue (LFZ), Morguilla (MFZ) y Mocha-Villarrica (MVFZ) basadas en el mapa geológico de la figura 3.1 perteneciente al trabajo de Melnick et al., 2009.	56
5.12. Diagramas <i>beachball</i> para eventos 1 al 3 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	56
5.13. Diagramas <i>beachball</i> para eventos 4 y 5 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	57

5.14. Localizaciones de las 7 soluciones finales de mecanismo focal producto del <i>re-picking</i> de los 14 eventos del grupo. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. Las líneas continuas representan las localizaciones aproximadas de las fallas de Lanalhue (LFZ), Morguilla (MFZ) y Mocha-Villarrica (MVFZ) basadas en el mapa geológico de la figura 3.1 perteneciente al trabajo de Melnick et al., 2009.	58
5.15. Diagramas <i>beachball</i> para eventos 1 al 3 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	58
5.16. Diagramas <i>beachball</i> para eventos 4 al 6 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	59
5.17. Diagrama <i>beachball</i> del evento 7 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	59
5.18. Localizaciones de las 4 soluciones finales de mecanismo focal producto del <i>re-picking</i> de los 7 eventos del grupo. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. Las líneas continuas representan las localizaciones aproximadas de las fallas de Lanalhue (LFZ), Morguilla (MFZ) y Mocha-Villarrica (MVFZ) basadas en el mapa geológico de la figura 3.1 perteneciente al trabajo de Melnick et al., 2009.	60
5.19. Diagramas <i>beachball</i> para eventos 1 al 3 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	61
5.20. Diagrama <i>beachball</i> del evento 4 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.	61

Índice de cuadros

4.1.	Tabla de parámetros requeridos como RATLOG y su formulación.	38
4.2.	Tabla de los contenidos de las columnas del archivo de input requerido para utilizar FOCMEC.	39
5.1.	Detalles de las primeras 23 de un total de 43 soluciones de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC antes de la etapa del <i>re-picking</i> y de la selección de eventos con intereses particulares (trabajábamos con toda la base de datos). Eventos ordenados por fecha de registro.	46
5.2.	Detalles de las últimas 20 de un total de 43 soluciones de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC antes de la etapa del <i>re-picking</i> y de la selección de eventos con intereses particulares (trabajábamos con toda la base de datos). Eventos ordenados por fecha de registro.	47
5.3.	Detalles de las 12 soluciones (de un total de 19 eventos) de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC luego del <i>re-picking</i> para el 1 ^{er} grupo de sismos. Eventos ordenados por fecha de registro.	50
5.4.	Detalles de las 4 soluciones (de un total de 10 eventos) de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC luego del <i>re-picking</i> para el 2 ^{do} grupo de sismos. Eventos ordenados por fecha de registro.	53
5.5.	Detalles de las 5 soluciones (de un total de 8 eventos) de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC luego del <i>re-picking</i> para el 3 ^{er} grupo de sismos. Eventos ordenados por fecha de registro.	55
5.6.	Detalles de las 7 soluciones (de un total de 14 eventos) de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC luego del <i>re-picking</i> para el 4 ^{to} grupo de sismos. Eventos ordenados por fecha de registro.	57
5.7.	Detalles de las 4 soluciones (de un total de 7 eventos) de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC luego del <i>re-picking</i> para el 5 ^{to} grupo de sismos. Eventos ordenados por fecha de registro.	60

Resumen

Antes de Maule 2010 $M_w = 8,8$ Megathrust, la Península de Arauco (desde $37,2^\circ\text{S}$ hasta $38,5^\circ\text{S}$) había sido descrita como el resultado de la superposición entre las zonas de ruptura sísmica de los terremotos de Concepción 1835 $M_w = 8,5$ (Lomnitz, 2004) y Valdivia 1960 $M_w = 9,5$ (Kaizuka et al., 1973). Referencias científicas post-terremoto del Maule 2010 también sitúan la península entre los deslizamientos asociados a los terremotos de 1960 y 2010 mencionados con anterioridad (Moreno et al., 2012), adjudicándole la cualidad a esta región de estudiarse como barrera sísmica para eventos de esta categoría (Rietbrock et al., 2012; Moreno et al., 2012; Hicks et al., 2015). Estructuralmente, la península de Arauco corresponde a un alto arco delantero donde la plataforma continental con el paso del tiempo ha emergido a elevaciones por encima de 400 m, permitiendo la exposición de rocas marinas cenozoicas deformadas (Melnick et al., 2009). Mediante la recopilación de datos de estaciones sísmicas (locales) instaladas post-terremoto 2010 en tierra y mar, fue posible hacer una localización de eventos con datos de alta calidad para poder calcular sus mecanismos focales usando la metodología de Snoke, 2009. Automatizando este proceso se logra obtener fiables soluciones de mecanismos focales para eventos registrados en la zona, utilizando polaridades de las llegadas de onda P a las estaciones circundantes y tasas de máximas amplitudes SV/P, SH/P y SV/SH. Los mecanismos de las réplicas aportan información importante acerca de la orientación y tipo de fallas geológicas que tienen lugar en la región de estudio, para así comprender mejor la península y su comportamiento como barrera sísmica.

Introducción

El mecanismo focal de los terremotos es una de las bases de cualquier estudio sismotectónico. Con este término se define el estudio de la ocurrencia y características de los terremotos de una región en relación con las condiciones tectónicas y la dinámica general de la corteza terrestre; se basa por tanto en el estudio de la sismicidad y el mecanismo focal de los terremotos (Buforn y Pro, 2006). Contando con soluciones de mecanismo focal (SMF) de buena calidad, se pueden establecer conclusiones razonables acerca de la orientación y tipo de fallas geológicas localizadas a lo largo de la zona de estudio; aquel es el motivo del porqué esta investigación ha sido hecha mediante soluciones desde FOCMEC (Snoke, 2009), pese a sus requerimientos y manera poco automática de funcionar. Otros algoritmos recientes incluso con interfaz gráfica para trabajar (como Seiscomp3 por citar un ejemplo) procuran hacer el mismo trabajo requiriendo menor cantidad de parámetros y cuidados, sin embargo este estudio se basa en automatizar el uso de FOCMEC para generar SMF compilando datos reales provenientes de réplicas de Maule 2010 $M_w = 8,8$ en la Península de Arauco, lo que se refiere a calcular las SMF de manera sistemática para generar un catálogo sin interferencia humana.

La red IMAD (International Maule Aftershock Dataset) y estaciones OBS (Ocean Bottom Seismometers) localizadas de manera que puedan cubrir el área de estudio, nos han provisto de la data necesaria para poder llevar a cabo la investigación aportando sismogramas de numerosas réplicas del terremoto de Maule 2010 como también registros del terremoto de La Araucanía 2011 $M_w = 7,1$ (Ekström et al., 2012; Hicks et Rietbrock, 2015). Se aprovecha las polaridades de la llegada de ondas P a cada estación (para cada evento) y mediante arreglos numéricos es generada su proyección en la esfera focal.

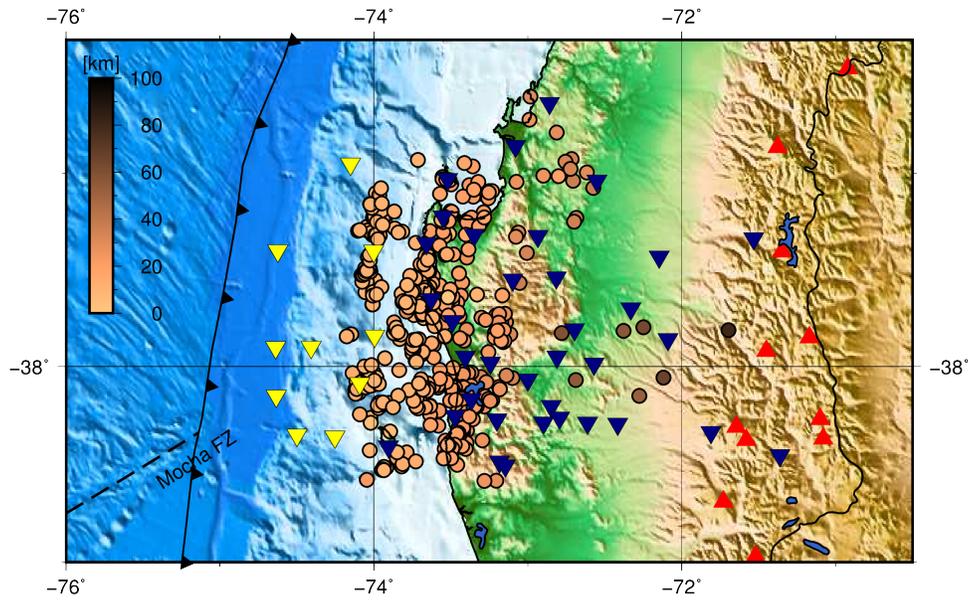


Figura 1.1: Zona de estudio. En círculos aparece la distribución de eventos localizados mediante VELEST (Kissling et al., 1994) gracias a los datos de estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos) y a la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), con su respectiva paleta de colores referente a profundidad. Se aprecia también la fosa graficada paralela al arco volcánico, el cual aparece señalado con triángulos rojos (la zona de Fractura de Mocho (MFZ) está extraída del trabajo de Lange et al., 2012).

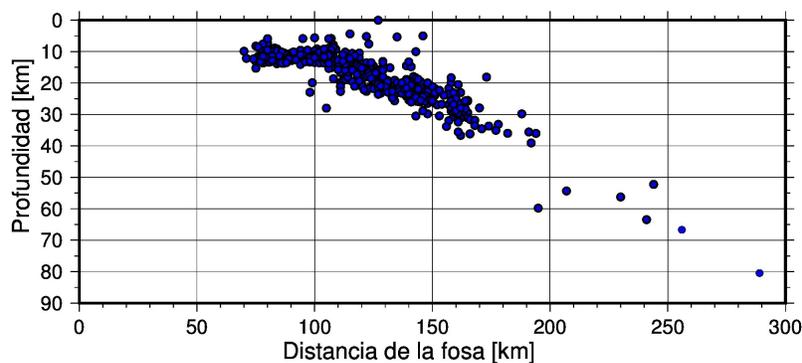


Figura 1.2: Perfil de los eventos destacados en la figura anterior para mostrar su relación de profundidad con respecto a la distancia de la fosa. Localizaciones mediante VELEST (Kissling et al., 1994) hechas por Azúa, 2017.

Con respecto al área de estudio, previamente ha sido objetivo de varios científicos (Bruhn, 2003; Haberland et al., 2006; Melnick et al., 2006; Moreno et al., 2008; Glodny

et al., 2008a; Melnick et al., 2009; Rietbrock et al., 2012; Moreno et al., 2012; Hicks et al., 2015; etc.) mostrando algunos de ellos sus SMF propuestas sobre fallas y eventos particulares, sobretodo después del 2010. Es aquella instancia la que permite hacer una comparación de potenciales resultados de esta investigación con lo que aquellos investigadores habían planteado con anterioridad. Cabe destacar que al ser esta la única investigación a la fecha en considerar los datos de estaciones OBS, contamos con una amplia cobertura espacial y también un mayor número de réplicas con buena localización.

Si hablamos de grandes terremotos ocurridos en la zona, obviamente se destaca Valdivia 1960 $M_w = 9,5$ con una longitud de ruptura cercana a 1000 km, iniciando en la península. También hasta esta zona tuvo lugar el término de la ruptura asociada al terremoto de Maule 2010 $M_w = 8,8$ de aproximadamente 500 km de largo (Moreno et al., 2010; Melnick et al., 2012a); como ambas áreas de ruptura acaban en la Península de Arauco, existen teorías e investigaciones que caracterizan a la zona de estudio como una barrera sísmica (Aki, 1979; Moreno et al., 2009; Melnick et al., 2009; Melnick et al., 2012a; Rietbrock et al., 2012; Moreno et al., 2012; Hicks et Rietbrock., 2015), afirmando la existencia de barreras sísmicas en el sótano continental de Arauco (Melnick et al., 2009).

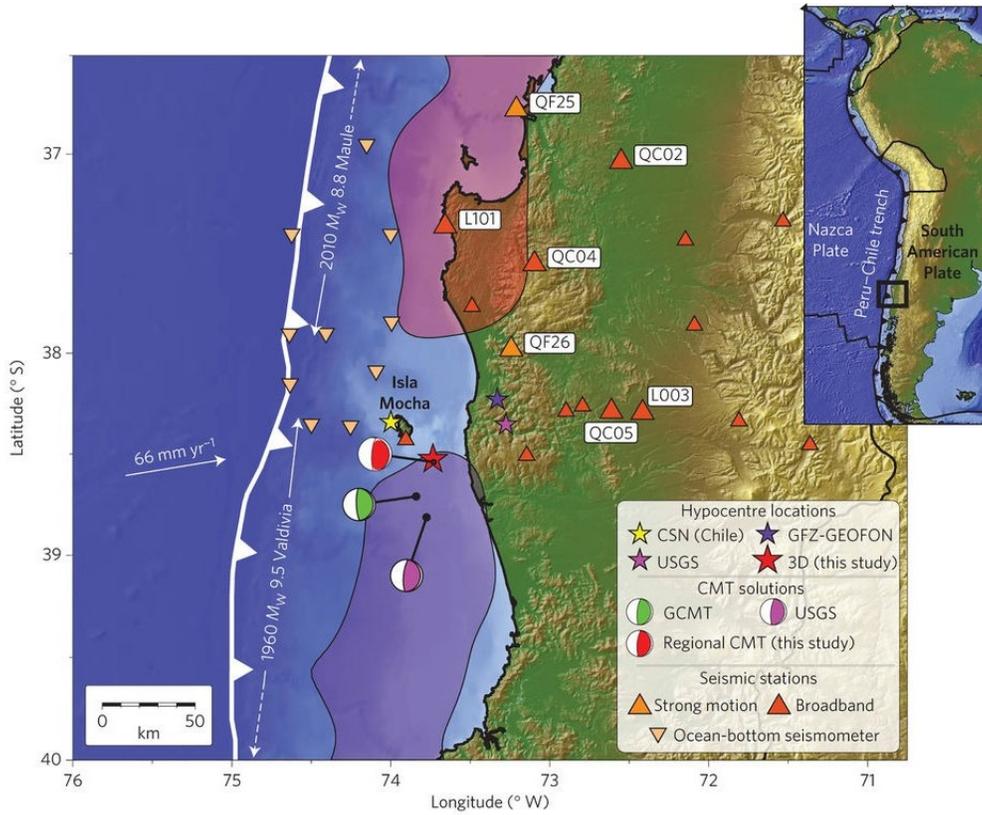


Figura 1.3: Límites de las áreas de rupturas de los terremotos de Valdivia 1960 $M_w = 9,5$ (inferior en azul) y Maule 2010 $M_w = 8,8$ (superior en violeta). Se aprecia como gran parte de la península de Arauco no forma parte de aquellas rupturas. Imagen extraída del trabajo de Hicks et Rietbrock, 2015.

1.1. Hipótesis

- La información entregada sobre la sismicidad en la Península de Arauco, usando una red con OBS, ¿aporta significativamente a la comprensión de la tectónica de la zona de estudio?
- ¿Pueden las fallas superficiales presentes en la zona de estudio identificarse con las SMF obtenidas en la investigación?

1.2. Objetivos

Objetivo principal

- Automatizar la obtención de SMF desde FOCMEC mediante scripts que optimicen el proceso utilizando datos sísmicos de buena calidad (mínimo 10 llegadas de onda P, 3 llegadas de onda S y un Gap $< 220^\circ$); réplicas de Maule 2010 $M_w = 8,8$ Megathrust.

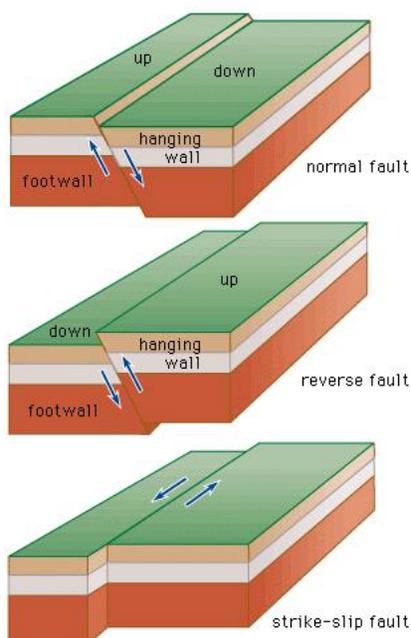
Objetivos específicos

- Entender la estructura geológica de la Península de Arauco.
- Explicar las SMF basándose en el estudio de literatura previa de la tectónica de esta región (Bruhn, 2003; Haberland et al., 2006; Melnick et al., 2006, 2009; Hicks et al., 2014).
- Como objetivo personal, llevar a cabo una recopilación teórica de lo aplicable a esta investigación desde mis ramos del área de Tierra Sólida y una aplicación completa y práctica de las asignaturas de programación y procesamiento de datos cursadas durante la carrera.

En este capítulo se detallará toda la teoría necesaria para poder comprender a cabalidad el concepto de soluciones de mecanismos focales (SMF) tratados en el documento, como también una lista de conceptos aplicados.

2.1. Conceptos previos a las SMF

2.1.1. Falla geológica



©1994 Encyclopaedia Britannica, Inc.

Figura 2.1: Mecánica de las fallas geológicas. Las imágenes permiten apreciar el deslizamiento de los bloques de piso y techo en cada caso (Enciclopedia Británica, 1994).

En geología, las fallas son rupturas o grietas en la corteza terrestre, asociadas generalmente con límites entre las placas tectónicas de la Tierra o bien dentro de las placas (dado que las placas sufren deformación interna). Las fallas pueden ser activas o inactivas dependiendo si existe deslizamiento entre los bloques que las componen y también se clasifican de acuerdo al tipo de movimiento que presentan, como se mostró en la figura anterior.



Figura 2.2: Fotografía aérea de la falla de San Andrés, al sur de California, la cual marca la delimitación entre la placa Norteamericana y la placa Pacífica (fotografía extraída de la web <http://www.amusingplanet.com/2015/03/the-san-andreas-fault-of-california.html>).

2.1.2. Sismo

Puede definirse un sismo como la serie de movimientos bruscos o de menor intensidad (de acuerdo a la magnitud de su energía liberada) producidos por el deslizamiento de placas internas de la Tierra, las cuales acumularon energía durante un cierto periodo donde estuvieron acopladas.



Figura 2.3: Diagrama de ocurrencia de un evento sísmico, mostrando el foco de ruptura (hipocentro) y su proyección a la superficie (epicentro). Imagen extraída de la web <http://licenpedia.wikispaces.com/RELIEF> .

2.1.3. Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo (P y S) son ondas que se desplazan a través del medio antes de llegar a la superficie. Su velocidad depende de las propiedades del medio en el que se propagan, siendo la onda P, con movimiento compresional/dilatacional, más rápida que la onda S (la cual se mueve en un plano perpendicular a la dirección de onda P, no propagándose en líquidos).

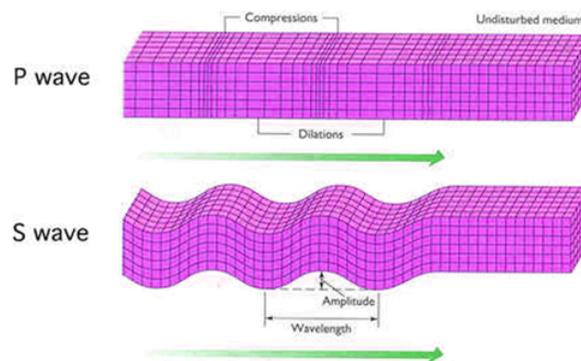


Figura 2.4: Diagrama de propagación de las ondas de cuerpo. Se aprecia el movimiento compresional/dilatacional de la onda P y al mismo tiempo el movimiento transversal de la onda S, manteniendo ambas la misma dirección de propagación. Imagen de la web <https://byjus.com/physics/p-wave/> .

Existen ecuaciones para determinar la velocidad de ondas de cuerpo, para usarse por ejemplo en la obtención de una llegada *S teórica* en caso de que nuestro sismograma

tenga claramente notoria la llegada P y sea imposible determinar una llegada S por efectos de ruido.

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

En las ecuaciones 2.1 y 2.2 se muestran como α y β las velocidades de propagación de las ondas de cuerpo P y S respectivamente, en un medio ECHI; Elástico, continuo, homogéneo e isotrópico. Se representa como λ y μ a los parámetros de Lamé y como $\kappa = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ al módulo de incompresibilidad.

El conocer la velocidad asociada a las ondas P y S permite entre otras cosas hacer una localización de sismos *locales* (estimados a una distancia no mayor de 200 km de la estación, para definirlo de manera blanda). Considerando ambas velocidades como una constante, se puede usar la siguiente ecuación basándonos en el básico razonamiento físico de *velocidad es igual a distancia dividido tiempo*:

$$(S - P)_{time} = \left(\frac{x}{v_s} - t_0 \right) - \left(\frac{x}{v_p} - t_0 \right) \Rightarrow x = (S - P)_{time} \left(\frac{v_p v_s}{v_p - v_s} \right) \quad (2.3)$$

donde v_p y v_s son las velocidades asociadas a las ondas P y S respectivamente, mientras $(S - P)_{time}$ se refiere a la diferencia de los tiempos de llegada entre aquellas ondas de cuerpo. El resultado es obtener aquella x , que refleja la distancia entre la estación y el sismo local. Claramente las localizaciones mencionadas en esta investigación no fueron obtenidas de esa manera, sino a través de métodos numéricos y el uso de software. El ejemplo mencionado es sólo con fines ilustrativos.

2.1.4. Estación sismológica

Una estación sísmica o sismológica es un establecimiento que cuenta con un sismómetro o acelerómetro, sitiado idealmente sobre roca firme con el fin de registrar oscilaciones del suelo en tiempo real y dentro de su alcance (como por ejemplo los tiempos y polaridades de llegadas de las ondas de cuerpo). La estación abastece progresivamente a un observatorio (o su entidad a cargo) con los datos registrados.

2.1.5. Sismograma

Representación gráfica de las frecuencias registradas de las oscilaciones del suelo por un sismómetro/acelerómetro ubicado en una estación sísmica. En la mayoría de los casos, se registra en dos componentes horizontales (Este/Oeste con Norte/Sur) y una componente vertical. El ancho de banda de la estación respectiva determina también la calidad de la gráfica y por consiguiente la calidad de las llegadas de las ondas de cuerpo,

como también la calidad de las polaridades asociadas a esas llegadas (sobretudo en el caso de este documento) registradas en la estación sismológica. Este tipo de gráficas también sirve para obtener la diferencia $(S - P)_{time}$ (de la que se habló anteriormente), el comportamiento de ondas superficiales, el origen temporal de potenciales eventos, etc.

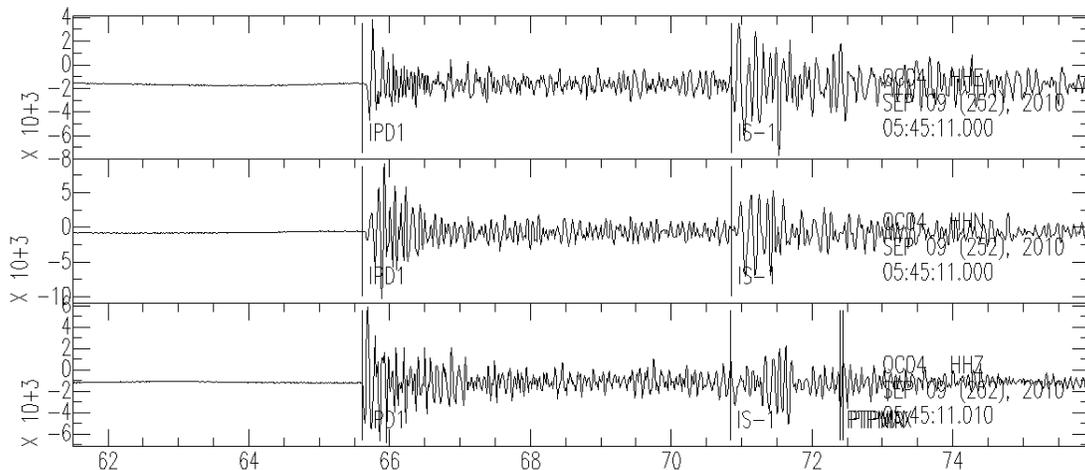


Figura 2.5: Sismograma de un evento registrado por la estación QC04 el jueves 9 de septiembre del 2010 a las 05:46 de la madrugada. Debido al ruido ambiental, las llegadas de onda P (IPD1) y S (IS-1) señaladas no son de la mejor calidad (por eso finalizan en 1). De arriba hacia abajo se aprecian las componentes Este/Oeste (HHE), Norte/Sur (HHN) y vertical (HHZ). Finalmente destacamos que las amplitudes alcanzadas por cada registro están en cuentas digitales.

2.1.6. Zona de subducción chilena

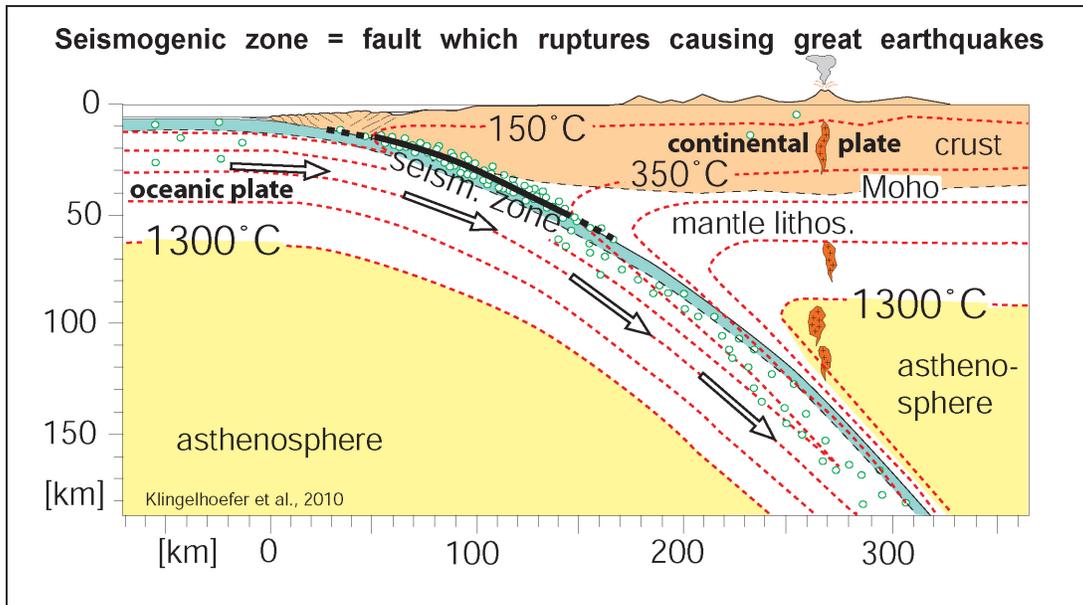


Figura 2.6: Esquema general de la zona de subducción chilena. A la izquierda se tiene la placa de Nazca y a la derecha la placa Sudamericana. Los círculos verdes representan sismos y como era de esperar, en la zona sísmogénica (zona de contacto pleno entre placas, estimada entre 10 y 40 km de profundidad) es donde se tiene la mayor cantidad de registro sísmico (esquema extraído del trabajo de Klingelhofer et al., 2010).

La subducción chilena está caracterizada por la placa de Nazca (océánica) que se adentra bajo la placa Sudamericana (continental) a una tasa de convergencia de ≈ 66 mm por año (Kendrick et al., 2003). En ocasiones, el estrés acumulado por el choque de placas es violentamente liberado, produciendo así un terremoto. Más adelante se aborda el tema con mayor énfasis, aunque la figura 2.6 es bastante ilustrativa.

2.1.7. Gap sísmico

Se denomina como Gap Sísmico a una región donde históricamente han ocurrido terremotos y desde un largo lapso no se ha presentado actividad sísmica de la magnitud esperada. Variados estudios de diversos científicos (Barrientos, 1987; Campos et al., 2002; Melnick et al., 2009; Moreno et al., 2010; etc.) habían caracterizado como Gap Sísmico al segmento de Concepción, por no haber sufrido rupturas significativas (del punto de vista de un terremoto) desde 1835.

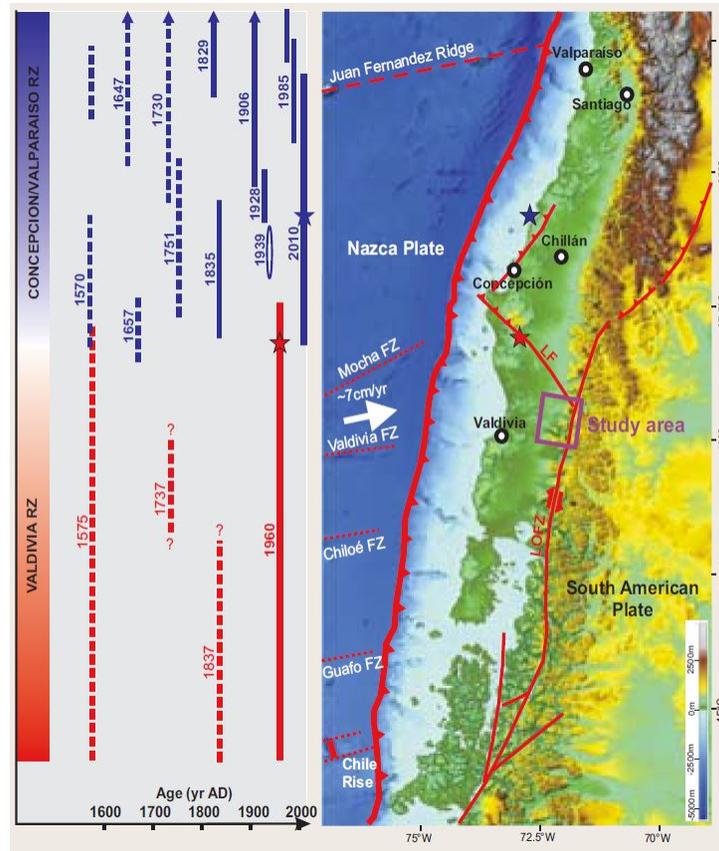


Figura 2.7: Esquema post terremoto del Maule 2010 que muestra los segmentos de rupturas de terremotos históricos en la zona centro sur de Chile. Se aprecia que el segmento de Concepción no presentaba registros desde 1835, por lo que era caracterizado como Gap Sísmico. La zona de estudio señalada en el mapa de la derecha no corresponde a la zona tratada en este documento, puesto que el esquema ha sido extraído del trabajo de Moernaut, 2010.

2.2. Parámetros necesarios para obtener SMF mediante FOCMEC

Para poder obtener una solución de mecanismo focal (SMF) mediante FOCMEC, tal vez sean necesarios muchos más parámetros y cuidados de lo que otros programas requerirían para graficar sus soluciones. En esta sección trataremos cada uno de los parámetros que formarán parte del archivo de input necesario para poder correr el código.

2.2.1. Estación (STA)

Se requiere el nombre de la estación que registró un determinado evento. Pueden ser tres o cuatro letras (por ejemplo; EFI o QC04), sin embargo la automatización de las soluciones fue diseñada sólo para estaciones de cuatro letras.

2.2.2. Azimuth (AZIN)

Por definición, el azimuth es el ángulo con respecto al norte en sentido horario que se forma entre el evento en cuestión y la estación que lo registró. Su valor debe expresarse en grados ($^{\circ}$).

2.2.3. RATLOG

El parámetro RATLOG corresponde a tasas de amplitudes máximas de las ondas de cuerpo extraídas desde los sismogramas. No son parámetros obligatorios para obtener soluciones, sin embargo al ingresar valores adecuados de ellos, ayudan a reducir el número de soluciones arrojadas por FOCMEC y a mejorar su estimación.

Se deben obtener tres tipos de RATLOG: $\log_{10}(SV/P)$, $\log_{10}(SH/P)$ y $\log_{10}(SV/SH)$. Donde SV , SH y P corresponden a las máximas amplitudes de ondas $S_{vertical}$, $S_{horizontal}$ y P respectivamente. Para obtenerlos fue necesaria una rotación de sismogramas, pero los detalles se dirán más adelante en el capítulo de metodología.

2.2.4. Ángulo de despegue o Take off Angle (TOANG y TOANG1)

Ángulo formado entre el camino que toman las ondas de cuerpo producidas por un evento al viajar por la Tierra (en dirección a las estaciones que lo registraron) y la recta formada entre la localización del evento y el centro de la Tierra. El valor varía entre la onda P y S, por lo tanto se obtienen e ingresan al programa por separado, considerando un takeoff-P (TOANG) si tenemos una polaridad P y un takeoff-S (TOANG1) si tenemos una polaridad S, respectivamente. Sus valores deben expresarse en grados ($^{\circ}$).

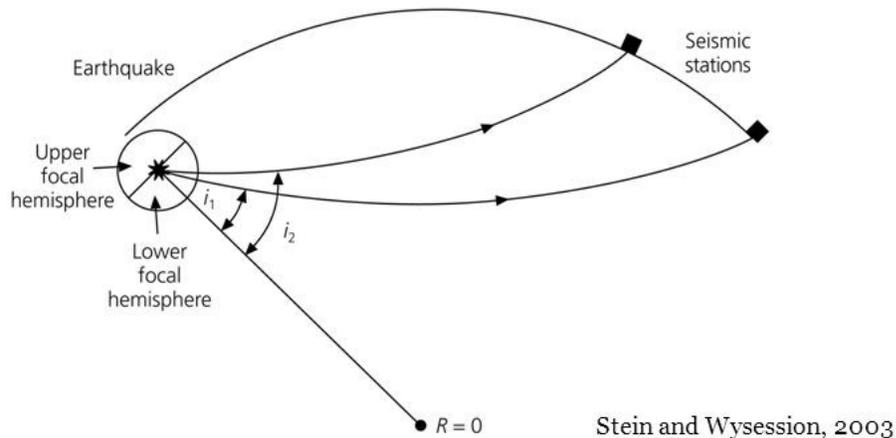


Figura 2.8: Famoso esquema de Stein y Wysession, 2003. Detalla de manera gráfica el parámetro i_n , correspondiente al ángulo de despegue para un número n de estaciones sísmicas que registraron el evento.

2.2.5. Polaridad (SENSE)

Nos referimos a polaridad cuando destacamos el sentido de la primera llegada de las ondas de cuerpo registrada en un sismograma. Dicha llegada puede ser de carácter impulsivo (si es bien marcada y fácil de identificar) o emergente (si se comporta más bien como una curva reiterada y difícil de estimar), además de presentar un sentido hacia arriba (U), abajo (D) o no identificado (-).

La polaridad es uno de los parámetros más exigentes por el programa. Por consiguiente se debe tener mucho cuidado al ingresar una polaridad asegurando su buena calidad, porque podría arruinar por completo la solución.

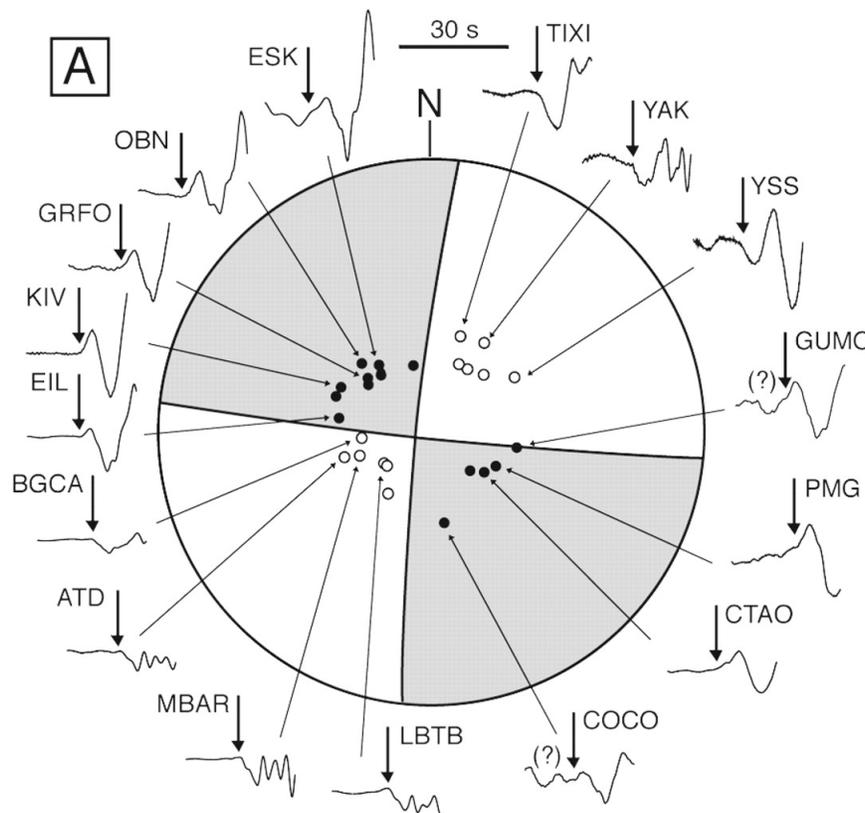


Figura 2.9: SMF extraída del trabajo de Ozacar y Beck, 2004. Basándose en las polaridades entregadas por las estaciones señaladas, se ha ajustado una solución de mecanismo focal, dejando las polaridades hacia arriba en la parte colorida de la solución y las polaridades que bajan en la parte en blanco. La solución obtenida es de tipo strike-slip (puede haber mostrado un mecanismo focal propio de esta investigación con sus respectivas polaridades, pero aquella representación es bastante conocida y fácil de comprender).

2.3. Soluciones de Mecanismo Focal

2.3.1. Tensor de momento

Las SMF entregan también información acerca del tensor de momento, el cual podemos entender como la integral de volumen del estrés liberado asociado con un terremoto (Snoke, 1989). Un tensor de momento es capaz de caracterizar fallas de eventos microsísmicos, dar información avanzada de propagación de fracturas y sus redes, caracterizar volúmenes, superficies, etc. Por los efectos de expresar un mecanismo focal como una doble cupla, el tensor de momento se deglosa en tres (en vez de nueve) componentes independientes (Snoke, 2009) y ortogonales: P, T y N, que representan los ejes de compresión, tensión y el eje nulo, respectivamente.

En resumidas cuentas, lo más interesante del tensor de momento es que el plano de falla en el cual un terremoto fue generado se ubica a 45° de los ejes P y T, conteniendo al eje N. Se puede sacar directamente de una SMF la orientación del plano de falla, la dirección del deslizamiento del bloque de techo y el tipo de falla involucrada en el sismo, considerando además a los grandes círculos como planos nodales. Para cada tensor de momento, siempre hay que tener en cuenta que los planos nodales ofrecidos como respuesta corresponden al plano de falla y al auxiliar, diferenciándose sólo a través de argumentos geológicos de la zona de estudio.

Para leer más acerca de la teoría asociada al tensor de momento, recomiendo revisar artículos como el de Jost y Herrmann (1989).

2.3.2. Diagrama Beachball o Pelota de playa

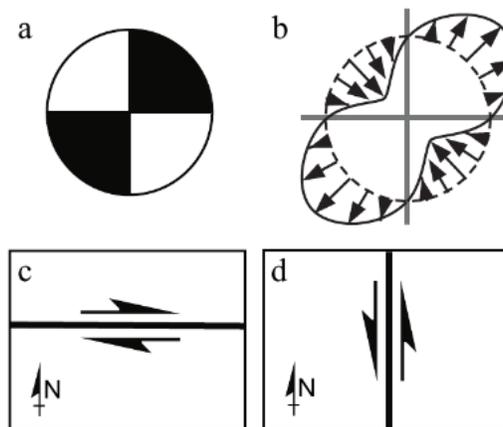
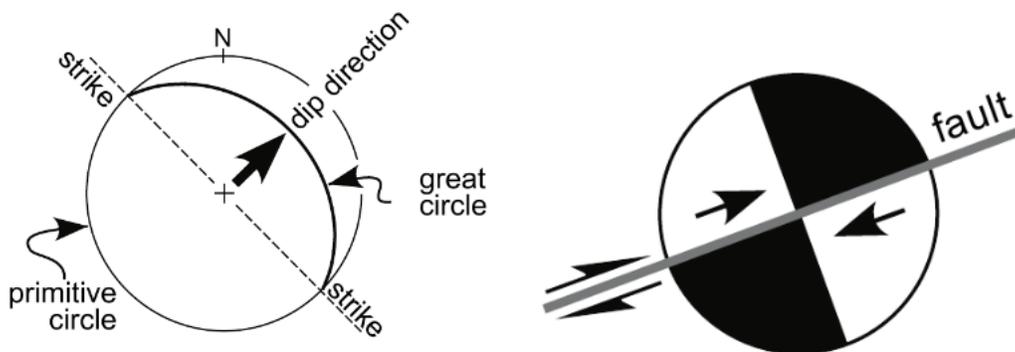


Figura 2.10: Diagrama de un mecanismo focal de tipo strike-slip. Desde (a) puede apreciarse el diseño típico, mientras en (b) se enseña el patrón de radiación; asociando siempre una fuente a la sección colorida y un sumidero a la sección en blanco. A propósito del plano de falla asociada, (c) y (d) muestran las potenciales orientaciones.

Considerando un movimiento de partículas, centramos el evento sísmico al medio de la pelota como se muestra en la figura 2.10 (a), donde el cuadrante negro se representa como fuente (partículas se alejan de la zona) y el cuadrante blanco como sumidero (partículas son atraídas a la zona).



(a) *Proyección de rumbo (strike) y manteo (dip).*

(b) *Falla de tipo strike-slip dextral.*

Figura 2.11: Gráficas para poder visualizar: (a) el ángulo de 90° entre el rumbo y el manteo; (b) Plano de falla adjudicado a un mecanismo focal de tipo strike-slip dextral, decidido bajo argumentos geológicos de su zona de estudio.

2.3.3. Strike (Rumbo), Dip (Manteo) y Rake (Slip/Deslizamiento)

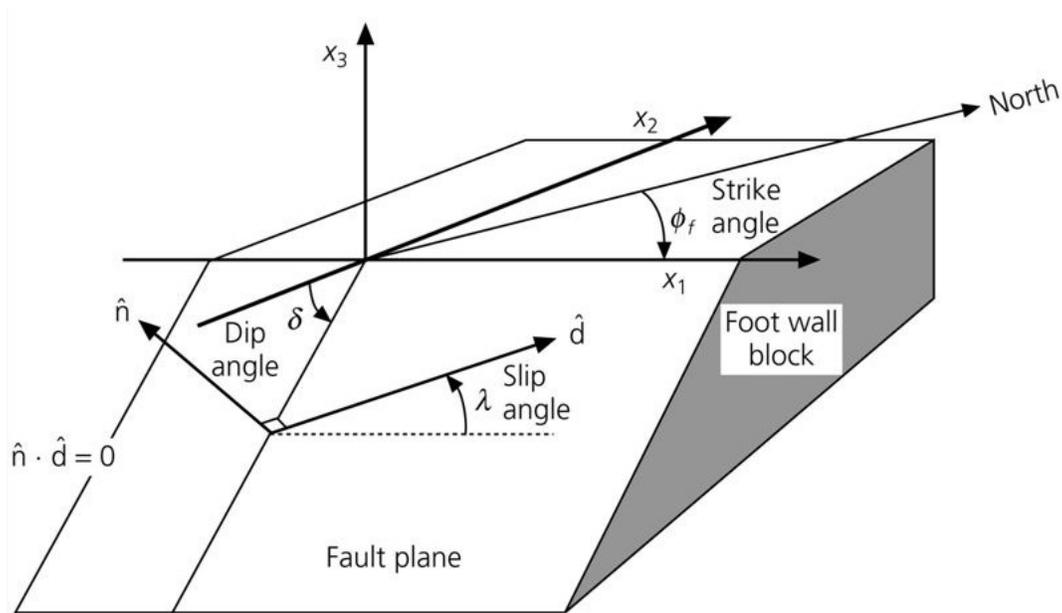


Figura 2.12: Diagrama donde se pueden apreciar los diferentes ángulos correspondientes al movimiento de un bloque con respecto a otro (pensándolo como si fueran fallas). \hat{n} es el vector normal al plano de falla, ϕ_f corresponde al ángulo del rumbo, δ es el ángulo de manteo, \hat{d} es el vector de deslizamiento y λ corresponde al ángulo de deslizamiento. Todos los ángulos medidos en grados (diagrama extraído del trabajo de Stein y Wysession, 2003).

Del diagrama mostrado en la figura de arriba, definiremos el rumbo (strike) como el ángulo con respecto al norte que forma la orientación de nuestra falla, medido en sentido horario. El manteo (dip) es el ángulo que se mide perpendicular al rumbo con respecto a la horizontal, mirando hacia abajo (tal y como una bisagra de una puerta) y representa el buzamiento. El ángulo de deslizamiento (rake o slip) es el que se forma entre el eje x_1 (que representa la dirección del rumbo) y el plano de la falla.

2.3.4. Tipos de mecanismos focales:

Los cuatro principales tipos de mecanismos focales existentes son: Strike-Slip, Normal, Inverso y Oblicuo. Comprendiendo la forma característica que tiene cada uno, se hace sencillo diferenciar o dar una caracterización a priori de una solución con solo verla. Es comprensible que de la forma patrón (una de las cuatro que acabamos de mencionar) existan variaciones, desviaciones a la derecha/izquierda, inclinaciones o leves rotaciones de la esfera característica (puesto que todo depende de la combinación de ángulos de rumbo, manteo y deslizamiento asociada a cada SMF).

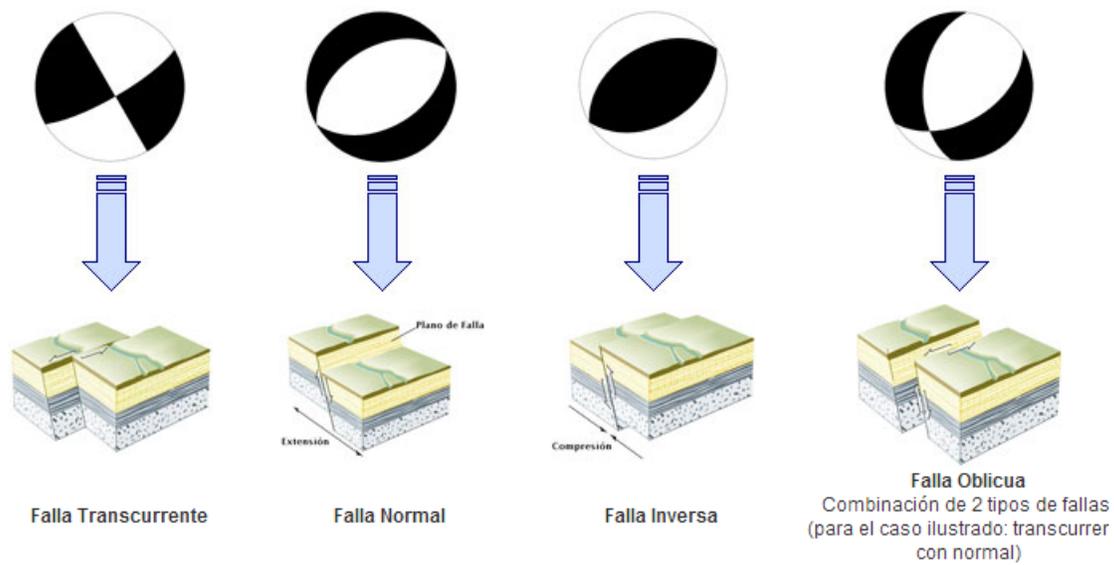


Figura 2.13: Principales mecanismos focales unidos por una flecha con su respectiva falla asociada. De izquierda a derecha, tenemos mecanismos strike-slip, normal, inverso y oblicuo, siendo este último combinación de otros dos. Imagen por cortesía del Instituto de Geociencias de la Universidad Complutense de Madrid, recuperado de: <http://www.igeo.ucm-csic.es/mobile/es/igeo/noticias/186-igeoquiz-terremoto-de-ja%C3%A9n>.

3.1. Península de Arauco

En este documento hablaremos tanto de la Península de Arauco (desde 37,2°S hasta 38,5°S) como de la región de Arauco-Nahuelbuta como símiles, refiriéndonos a la zona centro sur del territorio chileno que constituye un sector anómalo del antearco (del inglés *forearc*) en términos de topografía, geología y exhumación (reaparición por la erosión de una forma de relieve o modelado, después de un periodo de fosilización), ubicado entre las áreas de ruptura de los terremotos de Valdivia 1960 y Concepción 1835 (Melnick et al., 2009). He mencionado aquel terremoto de Concepción 1835 en lugar de Maule 2010 para resaltar que con anterioridad a este último se decía que el segmento de Concepción era considerado como un Gap Sísmico porque no había sufrido rupturas desde 1835 (Barrientos, 1987; Campos et al., 2002).

Pese a la recurrencia del término *barrera sísmica* en este documento, tal vez sea mejor aclarar inmediatamente que se refiere a regiones donde terminan (o comienzan, dependiendo del punto de vista que se quiera rescatar) las zonas de ruptura al ocurrir un gran terremoto del tipo megathrust, característicos de márgenes inversos de subducción como es el caso de Chile.

Retomando los antecedentes, la Península de Arauco corresponde a un alto arco delantero donde la plataforma continental con el paso del tiempo ha emergido a elevaciones por sobre 400 metros, permitiendo la exposición de rocas marinas cenozoicas deformadas (Melnick et al., 2009). Es de conocimiento general que el margen chileno está formado por la subducción de la Placa de Nazca en el Continente Sudamericano, a una tasa de convergencia de ≈ 66 mm por año, que ha disminuido aproximadamente un cuarenta por ciento durante los últimos 10 Ma (Kendrick et al., 2003).

La Placa de Nazca en la Región de Arauco tiene una edad de aproximadamente 32 Ma, la cual aumenta continuamente hacia el norte a la tasa de ~ 1 Ma por cada 100 km mientras avanzamos a lo largo de la fosa (Tebbens y Cande, 1997), además estudios han demostrado que distintos relieves costeros, como las penínsulas y las bahías, tienden a

formarse en límites sismotectónicos; algunas penínsulas que claramente corresponden a los límites históricos de rupturas de terremotos, como las penínsulas Mejillones ($23^{\circ}S$) y Arauco ($38^{\circ}S$), aparentemente no están relacionados con anomalías en la placa inferior (Melnick et al., 2009).

La posición de la Península de Arauco es coincidente con la terminación norte de la zona de falla Liquiñe-Ofqui, y el segmento de ruptura del terremoto de Valdivia corresponde a la extensión de la franja del arco delantero de Chiloé. La base de toda la franja de Chiloé al sur de Nahuelbuta consiste en una unidad bastante homogénea de rocas metamórficas interpretada como una cuña de acreción paleozoica, del inglés *Paleozoic Accretionary Wedge* (Glodny et al., 2005). A propósito del fenómeno citado como *Accretionary Wedge*, con respecto a la Isla Santa María (ISM) se afirma que fallas inversas activas en la interfase de las placas han sido las responsables de los progresivos levantamientos y hundimientos en diferentes zonas, además esta parte del margen chileno está fundamentalmente controlada por fallas inversas superficiales (Melnick et al., 2006). Tal y como la subducción de la MFZ (Zona de Fractura de Mocha) aporta un alto contenido de fluidos o sedimentos que ascienden hasta la interfaz de las placas (Manea et al., 2014; Moreno et al., 2014), en el caso de ISM la investigación de Melnick et al., 2012b afirma que post-terremoto de Maule 2010 hubieron varias zonas de la ISM en las que fluyó agua desde las fallas durante varios días y pobladores de Isla Mocha cuentan que en sectores de la isla, de fallas corticales no sólo era expulsada agua sino también gas y era posible encenderlo con un fósforo. Sedimentos subductados que implican que haya mayor presión de placas en aquellas zonas y eso impulsa la formación de otras fallas.

Trabajos anteriores han sugerido que la elevación anómala de la península de Arauco es el resultado de subducción de la MFZ (Boettcher, 1999; Cifuentes, 1989; Kaizuka et al., 1973; Lohrmann et al., 2006; Lomnitz, 2004). Esta zona de fractura es oblicua a la convergencia de placas del plioceno-cuaternario (Somoza, 1998), y por lo tanto su intersección con el margen ha migrado hacia el sur a ~ 100 km / Ma.

La tasa de deslizamiento promedio a lo largo de la LOFZ (Zona de Fractura de Liquiñe-Ofqui) en los últimos ~ 6 Ma disminuye desde ~ 32 a ~ 13 mm/a hacia el norte a lo largo del bloque de Chiloé (Rosenau et al., 2006), consistente con la alta partición de la convergencia oblicua (Melnick et al., 2009). Con respecto a la relación entre el bloque de Chiloé y la península de Arauco, se detallará en una subsección más adelante.

3.1.1. Antecedentes geológicos de la península de Arauco

El área terrestre está compuesta por cuatro principales unidades morfoestructurales (según el trabajo de Melnick et al., 2006): (1) La plataforma costera; formada por elevados sedimentos cenozoicos marinos y continentales, (2) la cordillera de la costa; un complejo acrecionario paleozoico y un arco magmático que constituyen la base cristalina continental, (3) la depresión intermedia; una cuenca baja rellena por conglomerados

del plioceno-cuaternario, y (4) la cordillera principal (Cordillera de los Andes); caracterizada por alta topografía y un arco volcánico activo (Mpodozis y Ramos, 1989) .

La cordillera de Nahuelbuta (tramo de la cordillera de la costa que se extiende entre los ríos Biobío e Imperial, que además sirve como frontera natural entre las regiones del Biobío y La Araucanía) tiene una morfología domal que forma una importante anomalía de drenaje regional a lo largo de la cordillera de la costa del sur de Chile central (Rehak et al., 2008). La exhumación rápida del núcleo tipo domo de Nahuelbuta comenzó hace $4 \pm 1,2$ Ma (coetáneo con la inversión de la cuenca adyacente de Arauco), lo que resultó en la emergencia de la Península de Arauco. Se propone también que esa homogeneidad mecánica de la microplaca del arco delantero (conformado por la plataforma costera, la cordillera de la costa y la depresión intermedia) delimita el segmento de Valdivia y que una marcada discontinuidad en el sótano continental de Arauco actúa como una barrera no homogénea que controla la nucleación y propagación de rupturas de tipo Valdivia 1960 (Melnick et al., 2009). Con respecto al ángulo de subducción, la placa de Nazca debajo de Nahuelbuta baja $12,7^\circ$, en contraste con $19,2^\circ$ y 15° hacia el norte y el sur, respectivamente (Krawczyk et al., 2006). Un ángulo de inmersión más bajo da como resultado una mayor tracción de cizalladura en la base de la placa continental, que se manifiesta en velocidades más rápidas del GPS intersectorial hacia la tierra (Moreno et al., 2008).

Terrazas marinas de la península de Arauco y alrededores fueron descritas (en trabajos como el de Kaizuka et al., 1973) como tres secuencias de superficies marinas levantadas del pleistoceno, las cuales contienen depósitos marinos poco profundos, conglomerados fluviales y arenas eólicas (Melnick et al., 2006). Existen superficies con depósitos similares cercanos a la costa, pero más angostas, menos pronunciadas y con falta de continuidad longitudinal, en las elevaciones más bajas en la región de Arauco-Concepción, y se correlacionan con periodos cálidos del pleistoceno tardío (Kaizuka et al., 1973).

Se dice que la mayor discontinuidad de la placa de Nazca en el centro sur de Chile es la Zona de Fracturas de Valdivia , a $\sim 40^\circ S$, que separa la corteza oceánica generada en la Dorsal Chilena hacia el sur, desde la corteza formada en la Dorsal del Pacífico Este (East Pacific Rise) hacia el norte (Tebbens y Cande, 1997). Además de mencionar que la fractura de Mocha se subduce bajo la parte central de la Península de Arauco, cabe también destacar que una superficie inferior marcada existe en el borde suroccidental de Arauco, cerca de Lebu, donde alcanza una elevación máxima de 125 metros y probablemente se formó durante el último período glacial. Por otro lado, la formación de Tubul consiste en arenisca y limolita menor depositada en aguas poco profundas, en el entorno de la plataforma costera durante el plioceno tardío al pleistoceno temprano (Nielsen y Valdovinos, 2008).

Varias fallas de cinemática desconocida, pero con una clara expresión morfológica forman una matriz curva que sigue la topografía a lo largo del flanco oriental de la cordillera de Nahuelbuta. Algunas de estas fallas yuxtaponen sedimentos del triásico con

intrusiones paleozoicas y controlan la ocurrencia de varios *roof pendants* (rocas metasedimentarias que constituyen el techo de un intrusivo) metamórficos, y pueden haberse formado antes del cenozoico. También se destaca que la cuenca de Purén está limitada por dos fallas inversas de inmersión NW y SW que se extienden desde la falla Lanalhue, además datos de reflexión sísmica inmediatamente al sur de la falla de Morguilla muestran una pendiente de fallas inversas que controlan la deposición del plioceno tardío a unidades cuaternarias. Por lo tanto, se considera que es probable que la escarpa de Morguilla sea la expresión superficial de una falla inversa de gran alcance, que golpea el noroeste, y que se inclina bruscamente hacia el noreste. No obstante, esta escarpa podría haber sido modificada por la erosión costera reciente y la deposición eólica (Melnick et al., 2009).

Finalizando, es un detalle públicamente conocido el hecho de que la Península de Arauco sea el punto local que se encuentre a menor distancia de la fosa (~ 70 km) y además es donde la cordillera de la costa (Nahuelbuta) alcanza sus mayores altitudes (~ 1525 m cerca de $38^\circ S$, siendo que el promedio de altura de la cordillera de la costa en el centro-sur de Chile es de ~ 700 m).

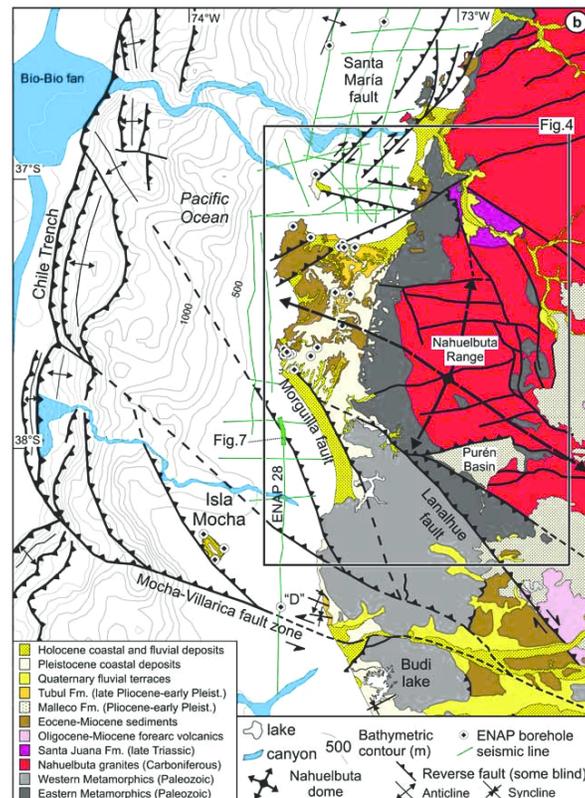


Figura 3.1: Mapa geológico de la región de Arauco-Nahuelbuta, donde pueden apreciarse las fallas de Mocha-Villarica, Lanalhue, Morguilla y Santa María con sus respectivas orientaciones (Melnick et al., 2009).

3.1.2. Con respecto a Isla Santa María

La Isla Santa María (ISM) está ubicada a 75 km hacia tierra (Latitud:-37.0333 S ; Longitud:-73.55 W) desde la Fosa de Chile sobre el sistema de fallas de Santa María (SMFS). Las fallas normales en la corteza de ISM se han interpretado como estructuras de momento de flexión relacionadas con el crecimiento oblicuo de anticlinales con núcleo de falla inversa que radican principalmente en la superficie de la placa (Melnick et al., 2006; Melnick et al., 2012a).

Isla Santa María consiste en dos superficies del pleistoceno asimétricamente inclinadas, que representan las extremidades anteriores de dos anticlinales que convergen en la isla y están rodeadas por fallas inversas. Además, el cúmulo norte adyacente a ISM está relacionado con una falla inversa abrupta del noreste, que aparentemente está enraizada en la interfaz de placa (Melnick et al., 2006a).

Análogamente a la región que rodea Isla Santa María, los terremotos asociados con la falla de Morguilla forman un grupo con una alineación continua en sección desde una profundidad de 5 km hasta la interfaz de placa, que debajo de esta región se encuentra a unos 27 km de profundidad (Melnick et al., 2009). Los mecanismos focales superficiales son compatibles con una falla inversa que golpea hacia el noroeste y se sumerge hacia el noreste con componentes de desgarre menores (Bruhn, 2003; Haberland et al., 2006).

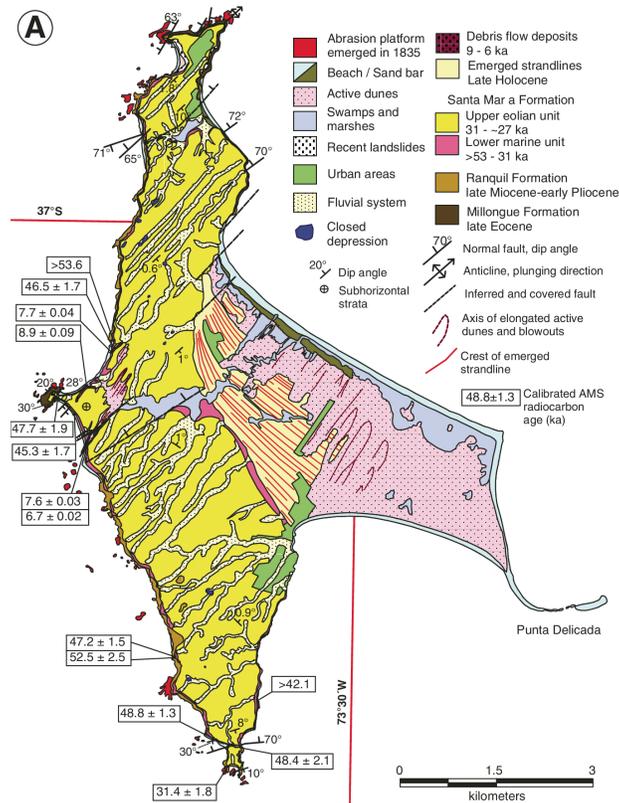


Figura 3.2: Mapa geológico y geomórfico de la Isla Santa María y su edad estructural estimada mediante el método de C^{14} para datación (extraída del trabajo de Melnick et al., 2006a).

3.1.3. En relación a la microplaca de Chiloé

La microplaca de Chiloé es una astilla de arco delantero desacoplada de la sección estable de América del Sur por la zona de falla de Liquiñe-Ofqui paralela al arco (Wang et He., 2008). Esta microplaca se extiende entre los paralelos $37^{\circ} 37' S$; $73^{\circ} 39' W$ en el puerto de Lebu con el inicio de la falla de Lanalhue y los $46^{\circ} 47' 50'' S$; $74^{\circ} 4' 4'' W$ en el istmo de Ofqui en el fin de la falla Liquiñe-Ofqui y en la triple confluencia de las placas Sudamericana, Antártica y de Nazca (Melnick et al., 2006). La traslación hacia el norte paralela al margen es una respuesta a la convergencia oblicua entre las placas de Nazca y Sudamérica, así como a la colisión oblicua y a la expansión de la elevación de Chile en el borde posterior del sur del bloque. El trabajo de Melnick et al., 2009 interpreta que las condiciones del bloque de arco delantero Arauco-Nahuelbuta son consistentes con datos regionales de fallas cinemáticas, termocronológicas y geomórficas que indican el desacoplamiento de esta microplaca de arco anterior y la colisión en curso desde el principio del Plioceno.

Con respecto al bloque de Chiloé, se sugiere que la flexión oroclinal en Arauco es una respuesta a una traslación hacia el norte de la astilla delantera de Chiloé y la colisión contra un contrafuerte, que resulta del efecto combinado de una inmersión de

loza menos profunda y contraste de fuerza entre rocas metamórficas heterogéneas hacia el sur y rocas de granito homogéneo en el rango de Nahuelbuta (Melnick et al., 2009).

En la región de Arauco-Chiloé, la placa inferior está cortada por varias zonas de fractura. Sin embargo, la rugosidad de la placa se suaviza con 1,5 a 2,3 km de sedimentos que llenan la zanja antes de entrar en la zona de interplacas. Además, el área de ruptura (cerca de 1000 km) del terremoto de Valdivia 1960 se propagó por cuatro de esas zonas de fracturas. El levantamiento y la formación de cúpulas en la región de Arauco-Nahuelbuta probablemente se deba a un engrosamiento de la corteza debido a la colisión de la microplaca de Chiloé que se traslada hacia el norte; este engrosamiento de la corteza aumenta las tensiones normales en el megathrust y, en consecuencia, el grado de acoplamiento entre placas (Melnick et al., 2009). El esfuerzo cortante necesario para romper el impulso mecánico es una función de la convergencia de la placa, la fuerza de la falla y la tensión (o carga normal) del *forearc* entre la costa y el arco volcánico (Scholz, 2002).

Resumiendo, se afirma que la colisión del bloque de Chiloé ha llevado a un acortamiento continuo en su extremo norte, lo que ha provocado un levantamiento del bloque Arauco-Nahuelbuta en los últimos ~ 4 Ma. Durante este tiempo, la fosa se ha llenado constantemente con sedimentos derivados de glaciaciones patagónicas repetidas y dos segmentos de la elevación de Chile han impactado en el margen sur, en el borde posterior de la astilla de Chiloé. Para este sector del margen andino (de la cordillera en la península), las características estructurales y petrofísicas de la placa superior aparentemente juegan un papel importante en el control de la segmentación de las rupturas sísmicas por subducción.

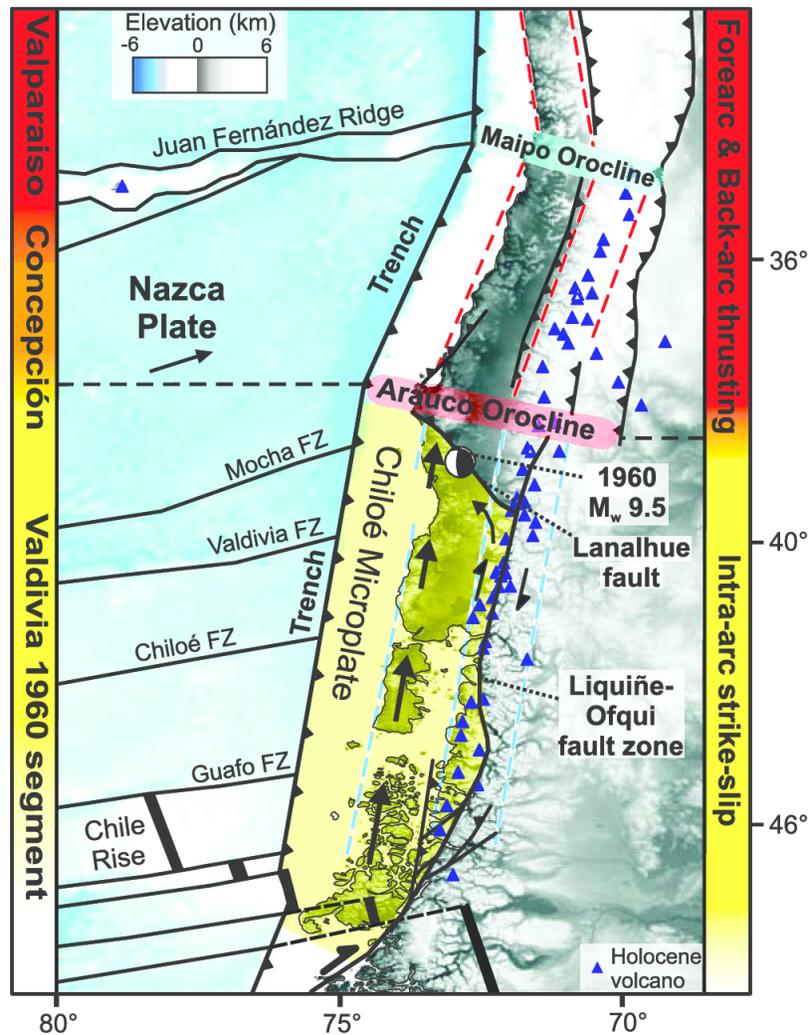


Figura 3.3: Desacoplamiento del bloque de Chiloé a lo largo de LOFZ, gatillado por la subducción presente en el punto triple de Chile y la convergencia oblicua de placas. Se señala con una flecha la dirección de desplazamiento del bloque, que origina el domo en Nahuelbuta y da lugar al alzamiento de la zona (Melnick et al., 2009).

En esta sección se explicará en detalle la obtención de parámetros y también su aplicación para poder conseguir las SMF desde FOCMEC, haciendo mención en la automatización del proceso; la parte fundamental y el motivo de la creación de este documento. Producto de lo mencionado, al final de este documento existen un script que se encarga de conseguir automáticamente (valga la redundancia) los parámetros necesarios y también las SMF para todos los eventos contando con que tenemos FOCMEC operativo en nuestro computador y además el picking (en detalle más adelante) está listo y archivado en su respectiva salida.

Aquel script no es más que la unión de 6 de los ejecutables con extensión *.sh* incluídos en el anexo. La mayoría de esos ejecutables son interactivos y se unieron en ese gran script (1034 líneas de código) con el fin de hacer el trabajo de corrido. También hay otro ejecutable que permite hacer todo el proceso para eventos particulares. En general, gran parte del código se basa en minuciosos arreglos de columnas utilizando el lenguaje de programación AWK (Aho, Kernighan y Weinberger, 1977).

Tanto la explicación detallada del código en sí como los ejecutables que hicieron posible este informe se encuentran en el anexo. A continuación se detallará el modo de operar de manera general durante la investigación.

4.1. Base de datos

La base de datos utilizada corresponde a un total de 505 sismos localizados a través de diversos tratamientos numéricos (Azúa, 2017) aplicados a los registros banda ancha de instrumentos de la red IMAD (International Maule Aftershock Deployment), instalados en la zona de estudio post terremoto de Maule 2010 por científicos internacionales y chilenos. Tampoco hay que dejar de lado la contribución de datos hecha por la Universidad de Liverpool (considerando las estaciones OBS con sus respectivos hidrófonos para registrar en fondo marino). El rango de registros instrumentales se extendió desde el viernes 20 de agosto del 2010 hasta el jueves 3 de marzo del 2011, descartando los registros de las estaciones L105 y L107 por ruido instrumental. Como se explicó en el marco teórico, las polaridades son uno de los parámetros más importantes a considerar, por lo mismo hubo que proceder a un re-picking (que será mencionado más adelante) y al final decidimos sólo llevarlo a cabo en 58 eventos del catálogo (para poder completar este documento en un semestre). Aquellos sismos fueron repartidos en 19 eventos superficiales (con profundidad \leq a 9 km), 10 eventos entre 125 y 142 km de la fosa (menor profundidad), 8 eventos con distancia a la fosa \approx 100 km (mayor profundidad), 14 eventos a distancias mayores a 155 km de la fosa (probablemente sobre el slab) y 7 eventos con profundidad \geq 50 km. De esta selección de eventos, contamos con 1147 llegadas identificadas de onda P y 589 llegadas de onda S.

Como este documento no está enfocado en la localización de eventos (por haber contado con un catálogo completo para trabajar), no se detallará la metodología para realizar localizaciones. Para leer más acerca de la localización de eventos, recomiendo revisar el documento de Azúa, 2017.

Como último detalle, destaco que para la automatización de la extracción de parámetros (sección 4.5) y el trabajo de los códigos en general, la base de datos ha sido separada en carpetas individuales por evento (dentro de una carpeta general) utilizando la sintaxis *año, día juliano y tiempo de registro* del evento localizado como nombre de carpeta. Tómese como ejemplo la carpeta *2010236064948*; *2010* corresponde al año, *236* corresponde al día juliano (28 de agosto), *064948* corresponde a las 06:49:48 de la mañana. Todo con respecto a la localización previa del evento.

4.2. Picking

El proceso de picking explicado en este documento podría parecer redundante, puesto que en diferentes estudios suele operarse de la misma manera. El picking es un proceso manual en el cual el científico selecciona las llegadas de ondas de cuerpo (P y S) directamente del sismograma, junto con su comportamiento (impulsivo o emergente), polaridad (Up, Down o $-$) y factor de calidad asociado. Refiriéndonos a este último parámetro, en investigaciones anteriores utilizando esta misma base de datos (como la habilitación profesional de la geofísica Kellen Azúa, 2016-2017), a las llegadas de ondas P y S se les asignaba un factor de calidad desde el 0 al 3 dependiendo si su error

asociado era 0.1, 0.2, 0.5 ó 1.0 segundos. En este documento consideraremos sólo registros de estaciones cuya fase P marcada tenga un error asociado de 0.1 segundos; osea sólo los que cuenten con llegadas P de calidad 0. En esta investigación no trabajaremos con polaridades de onda S, siendo la exigencia para marcar la llegada S que tenga calidad mínima 1 ($\pm 0,2$ segundos de error asociado al marcador) y reemplazando su polaridad por un signo menos $-$ (sin polaridad). Es necesario destacar que para fijar las llegadas de onda P debemos basarnos en la gráfica del canal vertical de los sismogramas, mientras que las llegadas de onda S se marcan en los canales horizontales.

Para efectos de localización de sismos, en algunos casos incluso es posible considerar datos de series de tiempo sometidas a filtros, sin embargo en este estudio (por trabajar con polaridades) no se dará lugar alguno a información extraída de datos filtrados en los resultados. Por último, la marca $T9$ que aparece en algunos sismogramas corresponde al tiempo de origen del evento según el autopicker (recordar que este documento no se basa en localización), sin embargo no se considera para resultados en absoluto.

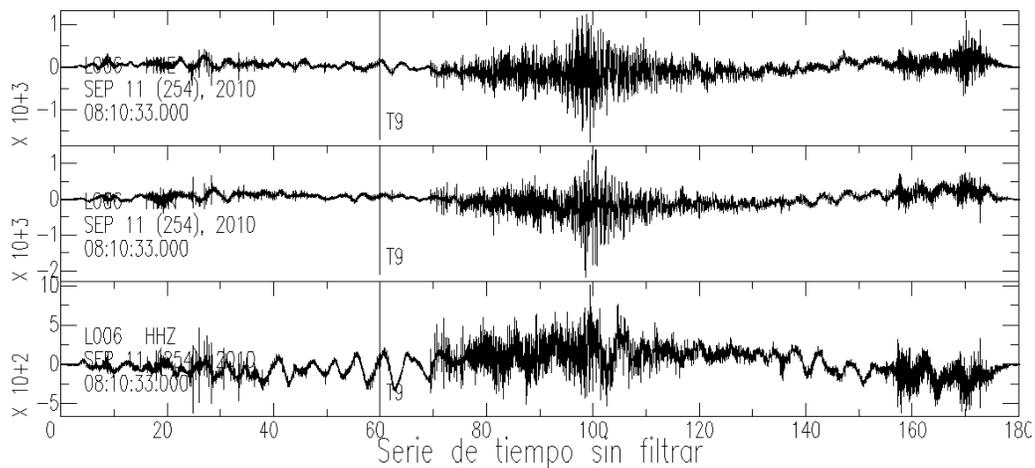


Figura 4.1: De abajo hacia arriba: Canal vertical (HHZ) y canales horizontales (HHN y HHE) del registro de un sismo el día 11 de septiembre del 2010 a las 08:10 de la mañana por la estación L006. Por el ruido ambiental registrado es imposible marcar manualmente las llegadas tanto de la onda P como de S. Recordar que aún existiendo la posibilidad de notar las llegadas al aplicar un filtro, aquellas polaridades no serían de fiar y por lo tanto no consideraremos series de tiempo filtradas.

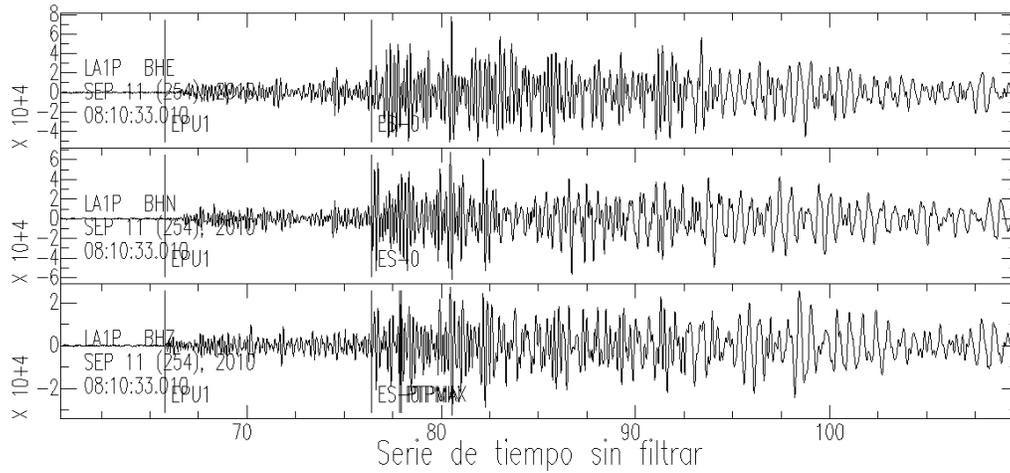


Figura 4.2: De abajo hacia arriba: Canal vertical (BHZ) y canales horizontales (BHN y BHE) del registro de un sismo el día 11 de septiembre del 2010 a las 08:10 de la mañana por la estación LA1P (OBS). Se distingue de buena forma la llegada de onda S en el canal Norte/Sur (BHN), sin embargo es imposible obtener una llegada P de calidad 0. Los datos de esta estación serán rechazados más adelante para obtener la SMF por no cumplir con la calidad requerida para la onda P.

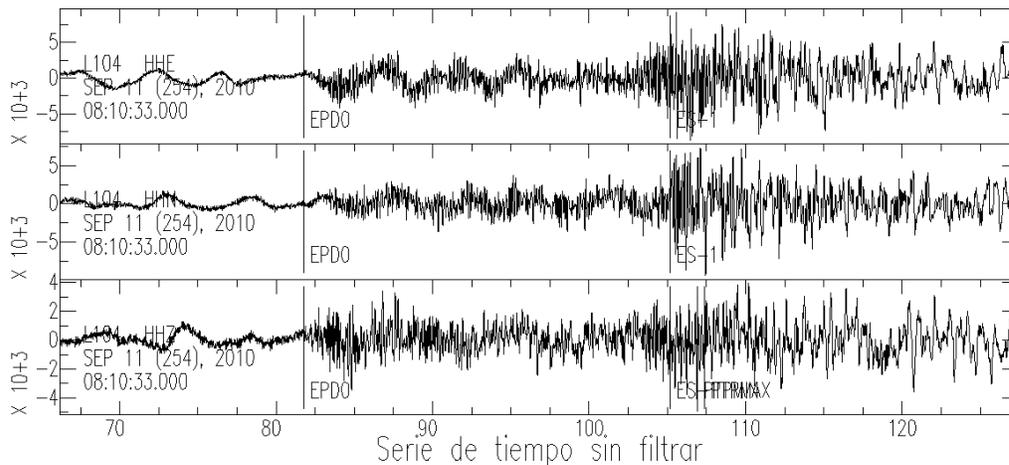


Figura 4.3: De abajo hacia arriba: Canal vertical (HHZ) y canales horizontales (HHN y HHE) del registro de un sismo el día 11 de septiembre del 2010 a las 08:10 de la mañana por la estación L104. Mediante un zoom es posible notar fiablemente la llegada de onda P, que tiene un comportamiento emergente con tendencia hacia abajo (EPD0). La llegada S está marcada con calidad 1 ($\pm 0,2$ segundos de error asociado al marcador), sin embargo por no trabajar con polaridades S será considerada de todos modos para la SMF.

4.2.1. SAC: Seismic Analysis Code

A través del software SAC 2000 (Seismic Analysis Code) de IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) podemos trabajar los sismogramas. Algunos ejemplos de lo permitido por este programa son, aparte del picking (gracias a una visualización con zoom del sismograma para reducir el error asociado a las llegadas registradas), el marcar las máximas amplitudes *peak to peak* de cada canal, realizar filtros a las series de tiempo, mostrar desde el *header* información directa del evento (una localización a priori), coordenadas de la estación que archivó los datos, etc. Tanto el manual como el software de SAC se encuentran en la web de IRIS, disponible en nuestro país (no así en todo el mundo), apto para sistemas operativos basados en GNU-Linux de 32 y 64 bits.

4.3. Resultados del picking

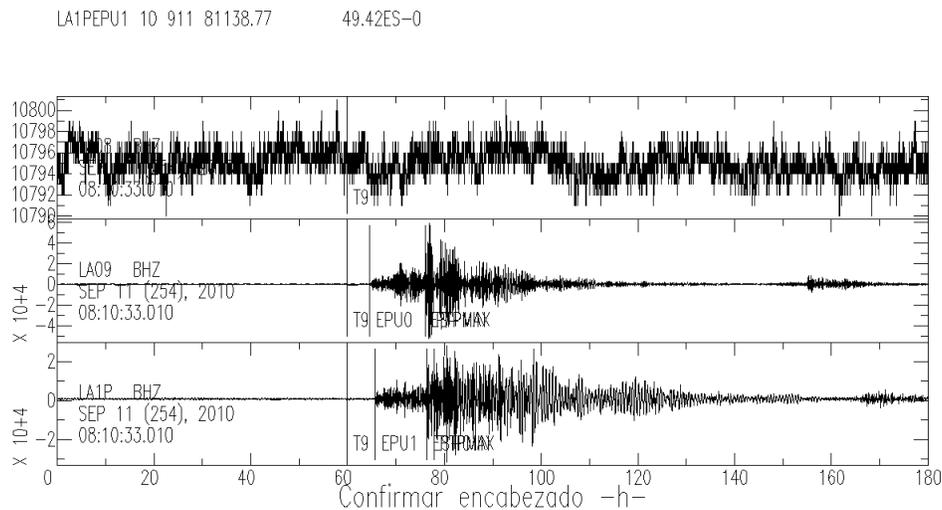


Figura 4.4: Canales verticales asociados al sismo del 11 de septiembre del 2010 a las 08:10 de la mañana registrado por las estaciones LA1P, LA09 y LA08 (de abajo hacia arriba). Al haber seleccionado la estación LA1P, se ha guardado en un archivo de salida su información asociada, la cual se denota en la esquina superior izquierda de la figura. Notar que la diferencia temporal en llegadas P de las series de tiempo de las estaciones LA1P y LA09 (el equipo LA08 no presenta buenas condiciones de funcionamiento, por eso no se considera) se debe a la diferencia de distancia entre la localización del sismo y las estaciones en particular.

Tal y como se ve en la figura de arriba, una vez completado el picking de las llegadas P y S en cada serie de tiempo correspondiente a cada estación que registró un evento en particular, el código utilizado abre automáticamente una ventana para comparar de 3 en 3 (por última vez y más en detalle) los canales verticales asociados a ese sismo. Posando el mouse sobre la serie de tiempo individual y pulsando la letra *h* del teclado, se rescata la información del picking individual: Estación, comportamiento de la llegada P, calidad de llegada P, año, mes, día y tiempo de la llegada P. También se guarda la información

asociada al pick de la fase S. Todos aquellos datos de un mismo evento tienen como salida un archivo de texto con extensión *.hpf* que se nombra como año, día juliano y tiempo de registro. Este archivo de texto será el corazón del análisis necesario para poder obtener las soluciones de mecanismos focales asociadas a cada evento particular.

4.4. Modelo de velocidades

El modelo de velocidades a utilizar es un derivado de la tomografía desarrollada por Hicks et al., 2014. Se le aplicaron algunos retoques (o ajustes de acuerdo a las localizaciones y propiedades de la zona de estudio) y luego fue necesario compilar aquel modelo resultante en TauP 2.4.1 (detallado en la siguiente subsección) para utilizarlo durante esta investigación. El modelo creado fue de extensión *.tvel*, uno de los códigos más recientes en cuanto a tiempos de viaje se refiere (Kennett et al., 1995). El formato de estos tipos de modelos consta en dos primeras líneas de comentarios que el programa ignorará, luego la primera columna corresponde a la profundidad de la Tierra (desde 0 a 6371 km), la segunda columna se asocia a v_p , la tercera a v_s y la cuarta a valores de densidad.

La tomografía de Hicks et al., 2014 presenta su valor máximo de profundidad a los 80 km. TauP 2.4.1 no nos dejará crear un modelo de extensión *.tvel* con tan poca información, por lo tanto fue necesario rellenar con datos del modelo *iasp91* (Kennett y Engdahl, 1991) desde los 360 km de profundidad en adelante. Está claro preguntarse porqué habría un salto desde los 80 km donde termina el aporte de Hicks et al., 2014 hasta los 360 km de *iasp91* y es debido a una disminución (que desemboca en una discontinuidad) de las velocidades de ondas de cuerpo presente entre los 80 y 360 km de profundidad, lo cual arrojaría una ola de errores en el código. Esta es la razón del salto de profundidad presente en nuestro modelo, sin embargo es necesario contar con datos hasta el radio terrestre para generar modelos de velocidad de extensión *.tvel* y el haberlo realizado de esta manera ha arrojado buenos resultados.

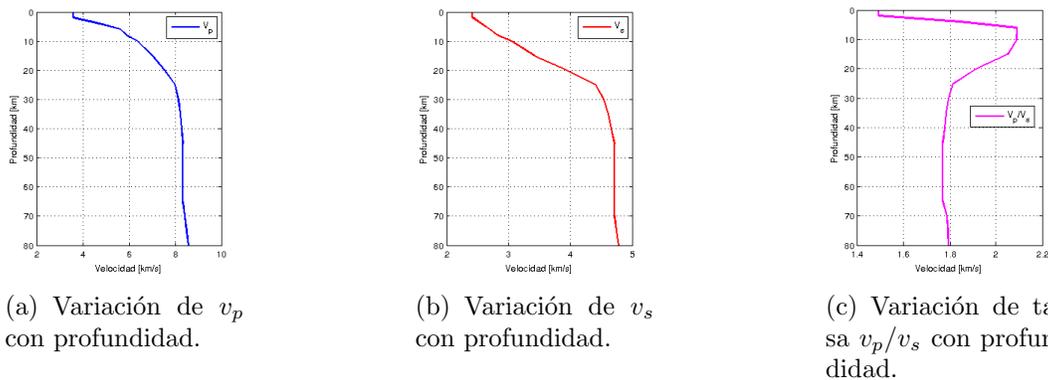


Figura 4.5: Gráfica del modelo utilizado en este estudio (obtenido a partir de modificaciones en la tomografía de Hicks et al., 2014). En (a), (b) y (c) puede apreciarse la variación con respecto a la profundidad presentada por los parámetros v_p , v_s y la tasa v_p/v_s respectivamente.

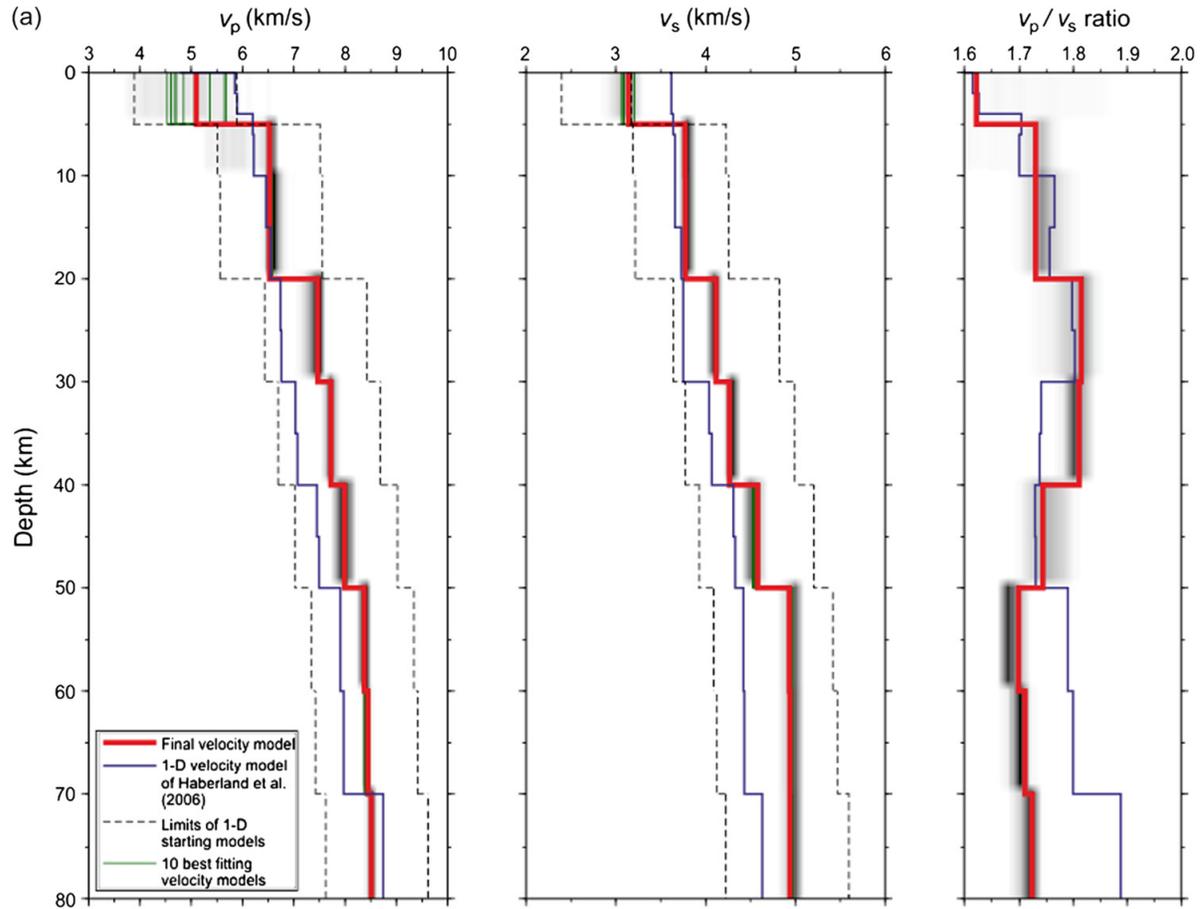


Figura 4.6: Se muestran los modelos de velocidades asociados a la zona de estudio según el trabajo de Hicks et al., 2014. A la izquierda, centro y derecha: Variaciones de v_p , v_s y v_p/v_s con profundidad, respectivamente (línea continua roja). La línea negra en cada gráfica representa el modelo 1-D obtenido por Haberland et al., 2006 y está ahí por efectos de comparación.

Sólo para efectos de visualización, en la figura 4.6 se muestra el modelo de velocidades que obtuvo Hicks et al., 2014. Al no poder conseguir el modelo puro utilizado por el científico, no lo he puesto en las mismas gráficas de variaciones v_p , v_s y v_p/v_s donde se mostró el modelo utilizado en esta investigación (Fig. 4.5). La parte positiva de no mezclar las gráficas es que la figura 4.6 (Hicks et al., 2014) muestra el modelo obtenido en comparación con el propuesto por Haberland et al., 2006 (además de los límites establecidos para los modelos 1-D con los que comenzó la investigación y los 10 modelos de velocidades que mejor calzan para la zona de estudio).

4.4.1. TauP 2.4.1: Flexible Seismic Travel-Time and Raypath Utilities

Para esta investigación se utiliza recurrentemente el programa TauP 2.4.1 (Crotwell y Owens, 2016) debido a una inconsistencia que sus versiones anteriores entregaban al obtener el *take-off angle* para nuestros eventos (lo que se detallará más adelante). A través de scripts automatizados es posible extraer desde este código parámetros asociados a las curvas de viaje de las diferentes fases producidas por un sismo, modificar modelos de velocidades ya existentes, generar modelos de velocidades propios para denotar la variación de los parámetros de salida, etc.; todo de manera bastante eficiente. Tanto los algoritmos presentes en el programa TauP 2.4.1 como sus versiones anteriores están basados en los métodos de Buland y Chapman (1983), siendo distribuída la primera versión de este software en el año 1998.

4.5. Obtención de parámetros

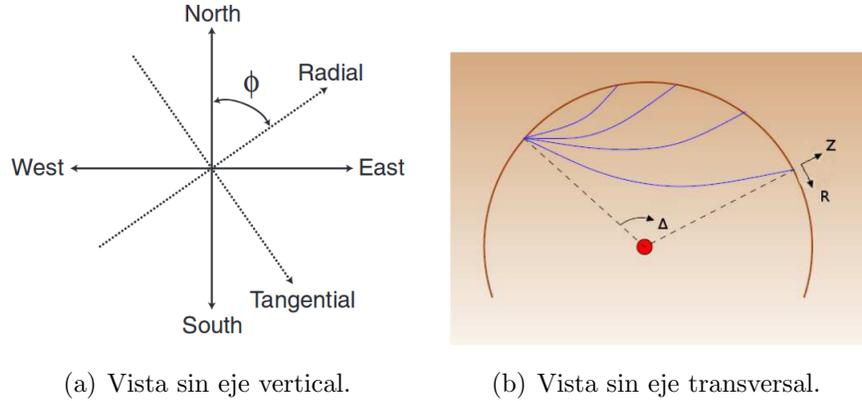
Para obtener los primeros parámetros, el código extrae desde el archivo de extensión *.hpf* asociado a cada evento la información necesaria para a través de ciclos *for* (estación por estación) poder registrar la polaridad, distancia epicentral, azimuth y take-off angle para llegadas P y S (mediante TauP, ver subsección 4.4.1). A medida que transcurre la iteración del proceso para cada estación almacenada en el archivo principal, se van extrayendo parámetros del archivo de texto *info.dat*, en el cual se encuentra toda la información con respecto a las estaciones (nombre, localización, red, etc.). Durante el proceso, la información referida al evento en análisis que requiera el código para estimar los parámetros es leída desde *velest_locs_summary.txt*, donde se encuentran las localizaciones mencionadas en la base de datos.

Luego de cada iteración (enumeradas por el número de estaciones que registraron el evento particular) los valores de los parámetros mencionados se almacenan en *stat_dist_azi_Ptakeoff_polaridad_Stakeoff.txt*, el cual es un archivo de texto que será posteriormente llamado por los demás ejecutables para continuar el análisis. Tal vez debió mencionarse al principio de esta sección, pero es muy importante recalcar que el código está diseñado para rechazar eventos que presenten menos de 5 registros con calidad 0 para las llegadas de onda P (por baja fiabilidad de los resultados).

4.5.1. Rotación de sismogramas

Para poder obtener soluciones desde FOCMEC, el parámetro RATLOG (ver subsección 2.2.3 del marco teórico) requiere ajustes basados en las componentes radial y transversal de los sismogramas. Las series de tiempo en la base de datos no contaban con estos canales (puesto que se repartían en Norte/Sur, Este/Oeste y el canal vertical), luego hubo que proceder a una rotación de sismogramas (comando *rotate to gcp* en SAC, entre otros) para así poder obtener los canales radial y transversal en términos del Norte/Sur y Este/Oeste. Es importante destacar que este proceso requiere que se

ingrese la información del evento (localización) directamente al *header* de los sismogramas (es de esperar que eso esté hecho, sin embargo la información del evento no venía en el header de ningún sismograma y hubo que escribirla).



(a) Vista sin eje vertical.

(b) Vista sin eje transversal.

Figura 4.7: Visualización esquemática de la transformación de canales horizontales hacia radial y transversal, conservando el canal vertical. En (a): ϕ corresponde al ángulo entre el eje radial y el norte, siendo el canal transversal ortogonal al radial. En (b): puede apreciarse el esquema de la Tierra para entender el concepto de GCP (Great Circle Path); el eje radial es el que sigue el camino de los *aviones al volar por el planeta* y se aplica la regla de la mano derecha para encontrar el eje transversal que está implícito en esta figura. Esquemas extraídos del trabajo de Ammon, 2001.

Como hemos dicho durante todo el documento, los sismogramas generalmente se registran con componentes verticales y horizontales. En algunos casos el análisis de aquellas series de tiempo es más fácil cuando estas observaciones se rotan en las coordenadas radial-tangencial, donde las ondas P, SV y Rayleigh se separan de las ondas SH y Love. Formalmente, el eje radial es la dirección a lo largo del GCP (Great Circle Path) que conecta el epicentro con la estación y es positivo en una dirección alejada de la fuente (Ammon, 2001). A pesar de que las ondas superficiales que acabo de mencionar no son objeto de nuestro estudio, FOCMEC requiere los canales radiales, transversales y verticales, por consecuente es también importante declarar como llevar a cabo aquella transformación, tal y como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} R(t) \\ T(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N(t) \\ E(t) \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$R(t) = \cos(\phi) \cdot N(t) + \sin(\phi) \cdot E(t) \quad (4.2)$$

$$T(t) = -\sin(\phi) \cdot N(t) + \cos(\phi) \cdot E(t) \quad (4.3)$$

De forma matricial, la ecuación 4.1 muestra como la matriz compuesta por la componente radial $R(t)$ del sismograma y la transversal $T(t)$ se expresan como el producto de una matriz cuadrada de $[2 \times 2]$ (compuesta por funciones trigonométricas en términos de ϕ : ángulo entre el eje radial y el norte) y un vector columna consistente en las componentes norte $N(t)$ y este $E(t)$ de la serie de tiempo (por eso la dependencia de

t). Finalmente queda expresado el despeje de la componente radial y transversal en función de *t*, ϕ y las componentes norte y este como se aprecia en las ecuaciones 4.2 y 4.3. En el trabajo de Ammon (2001) se encuentran estas ecuaciones junto con bastante ayuda en relación a la rotación de vectores y tensores, por eso es un documento digno de revisar para comprender más acerca de este tema.

4.5.2. Valores de RATLOG

Tal y como se mencionaba en la subsección 2.2.3 del marco teórico, existen 3 parámetros que debemos obtener:

RATLOG	Formulación
V	$\log_{10}(SV/P)$
H	$\log_{10}(SH/P)$
S	$\log_{10}(SV/SH)$

Cuadro 4.1: Tabla de parámetros requeridos como RATLOG y su formulación.

Del cuadro 4.1 se tiene que el parámetro RATLOG utiliza como valor de S (SV o SH) a la máxima amplitud de la fase S de un sismograma rotado. Las amplitudes P utilizadas en los 3 parámetros no sufren alteración puesto que se extrae del canal vertical (inalterado con respecto a la rotación). Las máximas amplitudes de ondas S para los parámetros V, H y S son extraídas desde los canales radial y transversal obtenidos gracias a la rotación de sismogramas explicada en la subsección 4.5.1 de la metodología.

Ya explicada la consistencia de los parámetros, hablaremos acerca de su obtención de manera directa. A través de scripts automáticos llamaremos al programa SAC (comandos *mtw*, *markptp*, *saclist*, entre otros) para que rescate la información necesaria directamente de los sismogramas rotados. Los datos serán almacenados iterativamente en archivos *.txt* a través de ciclos *for* para irlos guardando con el nombre de su respectiva estación de registro. Luego, estos archivos de texto serán almacenados mediante arreglos de columnas (*awk*) en un archivo de texto final, llamado *RATLOG.VHS.txt*, el cual contiene un valor de RATLOG raso ($\log_{10}(S/P)$, siendo S la máxima amplitud de los canales horizontales de los sismogramas sin rotar) y los parámetros V, H y S correspondientes a los registros de cada estación involucrada. Así, ya contamos con todos los parámetros necesarios para crear el archivo de input (con extensión *.inp*) necesario para correr FOCMEC.

4.6. Archivo de input para FOCMEC

El programa FOCMEC funciona a través de la lectura de un archivo de entrada (con extensión *.inp*) para arrojar dos archivos de salida: El primer archivo de salida es un documento de texto con extensión *.out*, el cual es un resumen preciso de las soluciones obtenidas y su fin es ser utilizado como entrada para otros análisis (como

el plotting en GMT por ejemplo). Por otro lado, el segundo archivo de salida es otro documento de texto pero con extensión *.lst* y corresponde a un completo resumen de todas las soluciones obtenidas. En el Apéndice A del trabajo de Snoke (2009) se detalla el formato que debe presentar el archivo de texto que usaremos como input; consta de una primera línea de comentarios (donde se puede escribir información importante del archivo en sí), luego el orden de las columnas se detalla en el siguiente cuadro:

Columna	Parámetro
1 ^{ra}	Nombre de estación
2 ^{da}	Azimuth
3 ^{ra}	Take-off Angle
4 ^{ta}	Polaridad o parámetro V, H, S
5 ^{ta}	Valor de RATLOG asociado

Cuadro 4.2: Tabla de los contenidos de las columnas del archivo de input requerido para utilizar FOCMEC.

En relación al cuadro 4.2 hay que rescatar ciertos cuidados:

- Los nombres de las estaciones en la 1^{ra} columna deben ser de 4 caracteres (letras o números). El programa también funciona con estaciones de 3 caracteres, sin embargo la automatización no cubre aquello dado que todas las estaciones de las redes asociadas a este documento tenían nombres de 4 caracteres (L102, L007, LA03, L004, etc.).
- Las columnas 1^{ra}, 2^{da} y 3^{ra} se encuentran separadas por dos espacios si se adaptan los valores de la 2^{da} y 3^{ra} a tres dígitos a la izquierda del punto (·) y dos a su derecha. Los inputs de prueba no utilizaban este formato pero fue una idea que solucionó más problemas de los que se puede imaginar al leer esta sección. En caso de valores negativos para la 5^{ta} columna, sólo sería separada por un espacio.
- Con respecto a la 3^{ra} columna, para cada estación en el archivo primero se pondrá el *Take-off Angle* de onda P acompañado de su polaridad asociada (Up como una U, Down como una D, o bien – si se desconoce) y luego tres *Take-off Angle* de onda S acompañados de las letras V, H y S respectivamente (asociadas a los parámetros del cuadro 4.2). En caso de no haberse pickeado la llegada de la onda S en el sismograma no hay problema, puesto que este parámetro se obtiene desde TauP como se menciona en la sección 4.5.
- En la 5^{ta} columna van los valores de RATLOG. Al lado del *Take-off Angle* de onda P no debe haber ningún valor, puesto que no hay asociación con la onda S. Los valores de los parámetros V, H y S (ver tabla 4.2) obtenidos para la estación en cuestión deben estar respectivamente al lado de las letras V, H y S de la 4^{ta} columna (recordando que la 3^{ra} y 4^{ta} columna están unidas). En caso de no haberse detectado la llegada S en alguna estación, simplemente su fracción correspondiente de la 5^{ta} columna quedaría en blanco.

- Como dijimos, cada columna se encuentra separada de las demás por una cantidad establecida de espacios, salvo la 3^{ra} y 4^{ta} por estar unidas. El código de FOCMEC está basado en algoritmos de *FORTRAN 77*, por lo tanto al compilar una entrada con un desorden (en lo más mínimo) de parámetros, el programa avisará de un error y no obtendremos soluciones. Para entenderlo mejor se ha puesto un ejemplo de archivo *.inp* a continuación.

```

Archivo de input para evento 2011002234309
L008  088.65  089.49U
L008  088.65  088.55V  0.576446
L008  088.65  088.55H  0.765266
L008  088.65  088.55S -0.18882
L101  353.75  060.66U
L101  353.75  049.35V
L101  353.75  049.35H
L101  353.75  049.35S
LA01  339.02  060.61U
LA01  339.02  049.21V  1.39838
LA01  339.02  049.21H  1.61487
LA01  339.02  049.21S -0.21649
LA07  319.02  059.83U
LA07  319.02  048.40V  1.27627
LA07  319.02  048.40H  1.32016
LA07  319.02  048.40S -0.043888
LA08  340.94  058.90U
LA08  340.94  048.08V  1.12201
LA08  340.94  048.08H  1.27413
LA08  340.94  048.08S -0.152119

```

Figura 4.8: Input de FOCMEC para una réplica asociada al terremoto de La Araucanía (2 de enero del 2011), siendo aquella réplica registrada a las 23:43 horas del mismo día del movimiento telúrico. Se aprecian 4 filas de datos por cada estación, producto del parámetro RATLOG que requiere una fila asociada a la polaridad del primer movimiento (sin RATLOG) y tres siguientes filas asociadas a los valores de RATLOG en V, H y S. Fue imposible pickear la llegada S en los registros de la estación L101, por eso no tiene RATLOG aunque presente *Take-off Angle* de onda S.

Finalmente, fue parte del trabajo la creación del archivo de input para cada evento a partir de los datos obtenidos con anterioridad y mediante minuciosos arreglos de columnas (y también comandos como *printf*) en scripts automatizados (buscar *input_create.sh* en el anexo). De manera eficiente el input del evento será llamado igual que la carpeta contenedora pero con extensión *.inp* (por ejemplo 2011040073631.inp); ya no habrá necesidad de tener que escribirlo cuidadosamente a mano.

4.7. Ingreso del input en FOCMEC

El archivo resultado de la sección pasada contenía todos los parámetros necesarios (y en su respectivas posiciones) para poder ser leído por FOCMEC. Un nuevo código entra en proceso, el cual se encarga de leer el archivo y entregar las soluciones. El programa reconocerá la cantidad de polaridades P y tasas de amplitudes (RATLOG) ingresadas, puesto que no hemos trabajado con polaridades SV y SH. Se mantiene la mayoría de los parámetros recomendados directamente por el programa (incluso el valor de 0.6 como máximo aceptado para algún RATLOG, diciendo que la amplitud horizontal puede ser a lo más cuatro veces mayor que la vertical) para el análisis, salvo la tasa v_p/v_s que se le asignará el valor de 1.78, arrojado por un diagrama de Wadati usando los sismos de la zona de estudio en la investigación de Hicks et al., 2014.

Las dos mayores problemáticas asociadas a esta parte del proceso fueron:

- Como el primer picking para los eventos (investigaciones pasadas) no fue hecho considerando en detalle la polaridad P, entonces para los primeros intentos de correr el programa fue difícil (pero no imposible) obtener soluciones sin permitir como máximo 1 error de polaridad (*Allowed P polarity errors = 1*). Mediante scripts automáticos se le ordenó a FOCMEC primero buscar soluciones sin permitir errores y en caso de ser imposible, permitir un error en P. Al graficar las soluciones con errores era posible ver cuales estaciones arruinaban la solución y descartarlas, lo cual se verá al final del capítulo.
- El archivo de salida con extensión *.lst* en ocasiones no presentaba formato ASCII, por lo cual era imposible extraer sus información para graficar los diagramas. Solucionamos el problema mediante más código.

4.8. Soluciones y calidad asociada

Como hemos dicho antes, FOCMEC arroja 2 archivos de salida con extensiones *.out* y *.lst*, en los cuales está el resultado del análisis de manera comprimida y detallada, respectivamente. El análisis de cada evento se hace de manera iterativa, para que cuando el programa estime un número adecuado de soluciones (directamente relacionado con la cantidad y calidad de estaciones que registraron el sismo) entonces detenga las iteraciones y muestre los resultados postulados. Para estudiantes de Geofísica en la Universidad de Concepción que quieran entender más el funcionamiento del algoritmo,

recomiendo inscribir la asignatura *PING: Problemas Inversos en Geofísica*, dictada por el Dr. Andrés Sepúlveda Allende.

Del listado de soluciones entregadas (alrededor de 7 en la mayoría de los eventos sin error de polaridad permitido) mediante código seleccionamos automáticamente la solución con menor error RMS a partir de las tasas de amplitudes para luego graficarla como se mostrará en la siguiente sección (además de ver un método para detectar estaciones que hayan registrado mal la polaridad a pesar de presentar claras llegadas de fases P y S).

```

Thu Nov 23 13:37:03 2017 for program FOCMEC
Archivo de salida focmec para evento 2011002234309
Input from a file 2011002234309.inp
Archivo de input para evento 2011002234309
Polarities/Errors: P 005/00 SV 000/00 SH 000/00
Input 15 ratios 0 allowed errors, maximum error of 0.60 VP/VS = 1.780
For ratios, 0.050 = P radiation cutoff 0.150 = S radiation cutoff
The minimum, increment and maximum B axis trend are 0.00 5.00 355.00
The limits for the B axis plunge are 0.00 5.00 90.00
The limits for the angle of the A axis are 0.00 5.00 85.00
R Ac/Al is number of acceptable ratios / allowed
RMS Err is the RMS of acceptable obs-calc ratios
RMS Err (all) is the RMS of all obs-calc ratios
  Dip Strike Rake Pol: P SV SH R Ac/Al RMS RErr RErr (All)
  81.82 262.28 -5.78 0.0 0.0 0.0 06/06 0.17 0.17
  85.79 260.05 -9.08 0.0 0.0 0.0 02/02 0.37 0.37
  85.02 265.01 -8.68 0.0 0.0 0.0 04/04 0.26 0.26
  90.00 83.08 10.00 0.0 0.0 0.0 02/02 0.38 0.38
  89.13 268.00 -9.96 0.0 0.0 0.0 02/02 0.38 0.38
  85.79 86.10 9.08 0.0 0.0 0.0 02/02 0.36 0.36

```

Figura 4.9: Archivo de salida (.out) desde FOCMEC correspondiente a la réplica del terremoto de La Araucanía mencionada en la figura 4.8. Desde abajo hacia arriba, la 8^{va} columna corresponde al RMS asociado a la cantidad de RATLOG permitidos por cada solución (7^{ma} columna). El mínimo valor de la 8^{va} columna decidirá la solución con que nos quedaremos (*Dip*, *Strike*, *Rake*), tomando en cuenta que los valores no aparecen ordenados de menor a mayor; esta vez fue sólo casualidad.

4.9. Gráfica en GMT

En estos momentos ya se ha determinado la solución (*Dip*, *Strike*, *Rake*) asociada a un evento particular. Mediante otro script automatizado (porsupuesto incluido en el anexo) se logra comparar gráficamente las 6 soluciones con menor RMS de polaridades obtenido (las gráficas irán en el capítulo de resultados), todo a través de arreglos de columnas (awk) para poder realizar diagramas de tipo *beachballs* en GMT.

Solutions with 0 allowed errors

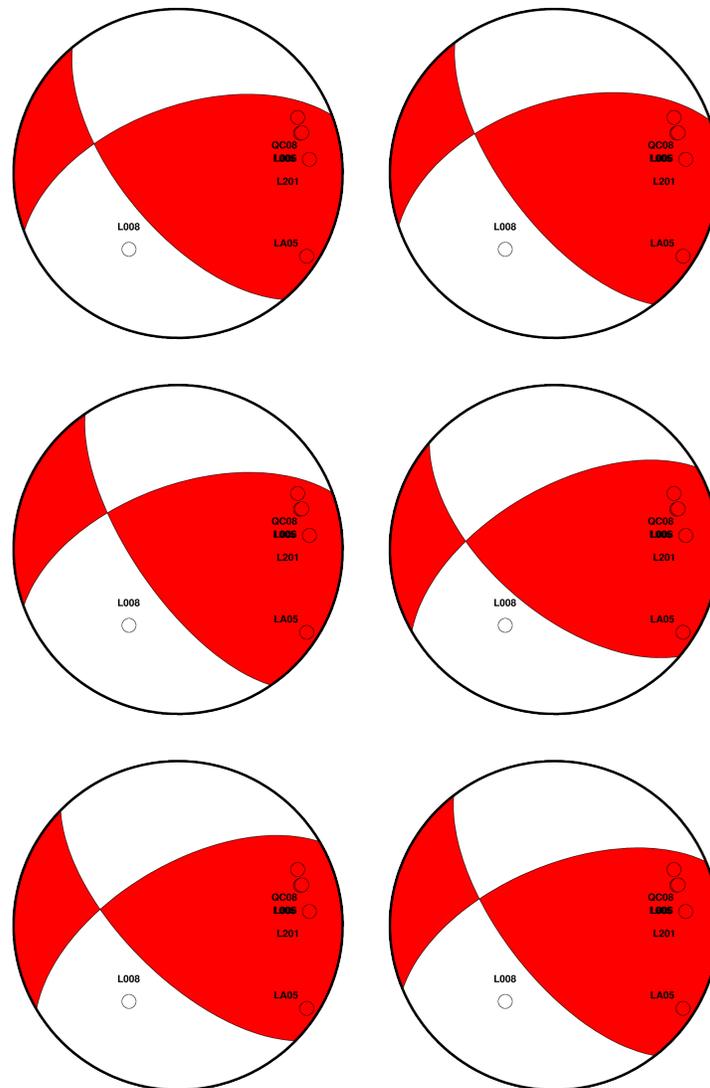
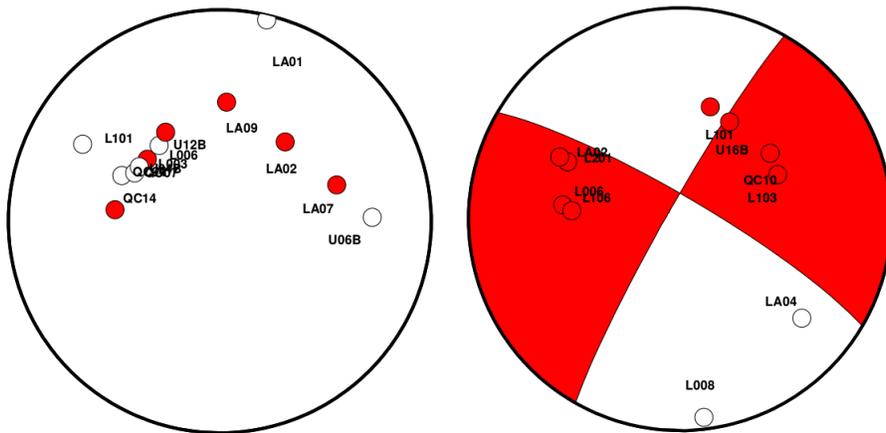


Figura 4.10: Gráfica de las 6 mejores soluciones (estando la mejor solución en la esquina superior derecha) de mecanismo focal entregadas por FOCMEC para un sismo registrado el 3 de enero del 2011 a las 13:49 horas (evento *2011003134955* sin errores de polaridad permitidos). Se entiende que es un mecanismo oblicuo con componente inversa. Esta figura es para mostrar como se comparó gráficamente las 6 mejores soluciones entregadas por FOCMEC para un evento basándose en los menores valores de RMS asociados a las tasas de amplitudes ingresadas.

4.9.1. Diagramas para eliminar y conservar estaciones

Como mencionamos en la sección pasada, existen estaciones que a pesar de mostrar un claro registro en llegadas de ondas de cuerpo, es imposible obtener soluciones para el evento si se consideran en FOCMEC. El script que se encarga del plotting en GMT también permite un método para detectar estas estaciones que arruinan la solución. Existen dos casos:

- Se obtengan o no soluciones para un evento, el código creará un diagrama circular en GMT, en el cual se localizan todas las estaciones involucradas (desde los archivos con información de estaciones) con respecto a la localización del evento. Basándose en las polaridades entregadas podremos saber cuál estación no debemos considerar si queremos que sea posible la adaptación de una SMF sobre el círculo.
- En caso de que se obtenga una solución mediante la permisón de un error de polaridad P, la gráfica mostrará cual estación se escapa de la respectiva región asociada a su polaridad; así podemos detectarla, revisarla, corregirla y/o eliminarla.



(a) Solución no obtenida.

(b) Solución obtenida con 1 error permitido en P.

Figura 4.11: La figura (a) corresponde al evento 2010253092832 con el picking inicial, sin cuidados de polaridades en primeras llegadas P; esto alude al caso 1 mencionado en esta sección y de este modo es imposible dibujar una SMF sobre aquel círculo. Por otra parte, la figura (b) corresponde al evento 2011021102516 y es fácil ver que debemos corregir la polaridad de la estación L101 (o bien quitarla del análisis de este evento) por salirse de la zona *up* (\uparrow) según la posición de las estaciones con respecto al sismo.

En este capítulo analizaremos las SMF obtenidas, considerando que no en todos los eventos fue posible aplicar exitosamente el proceso. A continuación se mostrarán los diagramas, tablas y mapas resultantes de la investigación en la zona de estudio.

5.1. Primeros resultados

En esta sección se tendrá en cuenta lo siguiente: Recordando que al inicio de la metodología explicamos que el análisis inició con 505 eventos (gatillados en el tiempo señalado), finalmente optamos por enfocarnos en 58 eventos con características particulares de profundidad y distancia de la fosa. El mapa de SMF y la tabla adjunta corresponden a nuestros primeros resultados, provenientes del análisis de los 505 eventos y sin *re-picking*. El hecho de no haber re-marcado las llegadas de ondas de cuerpo en los sismogramas implica que utilizamos las series de tiempo pickeadas pensando en los tiempos de llegada (no dándole una importancia relevante a las polaridades asociadas), lo cual se menciona reiteradamente durante el capítulo de metodología.

Del total de la base de datos, se obtuvieron 43 soluciones de mecanismo focal previo al *re-picking*, a modo de prueba. Entiéndase que eran 505 eventos y en un semestre no podrían haberse analizado todos de manera manual. Sólo fue posible obtener aquellas soluciones mediante una automatización total del código; el objetivo principal de nuestro trabajo. La obtención de estas soluciones dio por resultado que era totalmente posible automatizar el código, por lo tanto ahora estaríamos en condiciones de proceder al *re-picking*.

Evento	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	RMS
2010232052515	-37.6342	-73.4336	022.18	310.16	80.34	-2.61	0.33
2010232130004	-37.1964	-73.5028	022.66	9.49	47.85	39.32	0.37
2010235060950	-38.1658	-73.4245	023.21	115.66	60.50	42.39	0.43
2010235062321	-37.6154	-73.7768	013.09	297.69	80.00	0.00	0.17
2010239104157	-38.1715	-73.4673	019.59	188.97	66.07	26.34	0.33
2010240043925	-37.8163	-72.3773	056.29	199.72	86.60	-9.41	0.27
2010241172306	-38.3892	-73.5065	021.59	126.54	85.02	-8.68	0.16
2010242233506	-38.1912	-73.9693	012.35	5.82	82.36	6.47	0.39
2010243123957	-38.1980	-73.9465	013.47	166.36	61.12	72.81	0.25
2010244024853	-38.1533	-73.2759	028.91	272.88	60.13	-84.23	0.26
2010248040749	-38.2610	-73.4143	023.10	164.22	85.02	8.68	0.28
2010249030407	-38.0804	-74.0838	013.09	262.90	35.31	81.33	0.24
2010250034955	-37.0188	-73.5540	019.85	164.31	80.04	0.88	0.35
2010250092141	-37.0314	-73.5293	017.35	142.69	52.24	-50.77	0.36
2010250233828	-37.3951	-73.3853	019.91	259.92	70.79	29.84	0.21
2010251102502	-38.4223	-73.5396	022.30	127.86	69.75	-52.31	0.30
2010252083654	-37.2522	-73.9798	011.46	119.64	54.07	37.45	0.31
2010252091051	-37.1609	-74.0219	011.53	231.71	31.47	70.57	0.33
2010252180420	-37.9574	-73.9275	010.90	43.51	83.59	7.69	0.40
2010253213908	-38.3515	-73.4436	023.03	30.27	22.27	62.73	0.15
2010256164136	-37.7720	-73.6133	022.14	133.89	80.95	-4.26	0.26
2010259032900	-38.0542	-73.3043	030.46	107.04	46.03	-54.04	0.34

Cuadro 5.1: Detalles de las primeras 23 de un total de 43 soluciones de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC antes de la etapa del *re-picking* y de la selección de eventos con intereses particulares (trabajábamos con toda la base de datos). Eventos ordenados por fecha de registro.

Evento	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	RMS
2010260002709	-37.8310	-73.8478	011.70	345.36	81.82	-5.78	0.22
2010260221520	-38.0317	-73.3657	029.81	343.13	85.79	-9.08	0.26
2010265142611	-38.1080	-73.6538	018.30	348.00	80.04	-0.88	0.38
2010293061045	-37.5685	-73.0533	036.17	279.50	61.12	72.81	0.20
2010300153841	-37.3425	-73.9735	011.39	196.87	85.79	9.08	0.22
2010312181603	-38.1245	-73.6544	014.48	178.55	54.07	37.45	0.32
2010325120542	-38.1153	-74.1107	013.48	38.52	82.95	7.11	0.03
2010330074006	-37.3145	-73.5107	007.58	190.92	44.81	44.81	0.23
2010349043732	-38.5851	-73.2050	027.92	295.02	89.56	4.98	0.05
2010356191319	-37.8586	-73.8318	011.74	284.95	82.36	-6.47	0.33
2010359215435	-37.7883	-73.1889	025.76	356.01	70.32	-79.37	0.26
2010363065328	-38.1973	-73.9440	005.60	141.41	66.60	-68.12	0.30
2010365190503	-38.2132	-73.9714	013.10	107.12	60.13	84.23	0.32
2011002234309	-38.4025	-73.5134	014.82	262.28	81.82	-5.78	0.17
2011003033009	-38.4252	-73.4835	021.92	119.91	85.67	-2.50	0.20
2011003090748	-38.4685	-73.8508	014.03	268.11	50.14	22.91	0.36
2011004174146	-38.0335	-74.1382	013.30	119.07	80.34	2.61	0.11
2011014100846	-37.6241	-73.6513	012.22	121.39	80.15	-1.75	0.24
2011019065632	-38.4084	-73.4259	019.95	255.05	82.36	6.47	0.35
2011038155405	-37.6941	-73.7474	008.64	30.00	35.00	90.00	0.14
2011042100549	-37.6909	-73.7686	011.20	327.38	89.13	9.96	0.26

Cuadro 5.2: Detalles de las últimas 20 de un total de 43 soluciones de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC antes de la etapa del *re-picking* y de la selección de eventos con intereses particulares (trabajábamos con toda la base de datos). Eventos ordenados por fecha de registro.

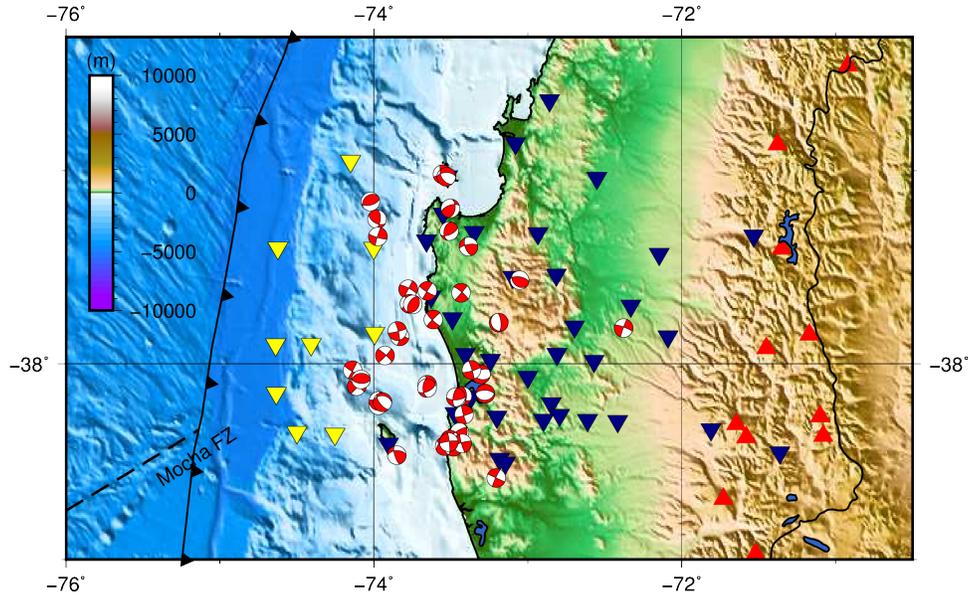


Figura 5.1: Mapa de las primeras 43 soluciones obtenidas de manera automática de un total de 505 eventos (sin revisión de picking) mediante la automatización del ingreso de parámetros y extracción de soluciones desde FOCMEC. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio.

Por tanto estos resultados son producto de un análisis a priori enfocándose en el correcto funcionamiento de la automatización, no nos enfocaremos en detallar al respecto ni graficarlos por separado. Para gráficas individuales recomiendo visitar la página web <https://members.elsi.jp/~george/focmec.html>, donde se encuentra una calculadora on-line de mecanismos focales que grafica los diagramas *beachball* al ingresarle los parámetros *strike*, *dip* y *rake*.

5.2. Soluciones de Mecanismo Focal para la zona de estudio

En la sección 4.1 de la metodología se mencionó que aquellos 505 eventos se habían reducido a 58 con particulares características de profundidad y distancia a la fosa. Estos 58 eventos fueron minuciosamente sometidos a un *re-picking*, obteniendo así 32 soluciones de mecanismo focal para sismos registrados en la zona de estudio. A continuación, luego del mapa de la localización de aquellas SMF se verá la información asociada a cada una en detalle, conforme a su respectivo grupo.

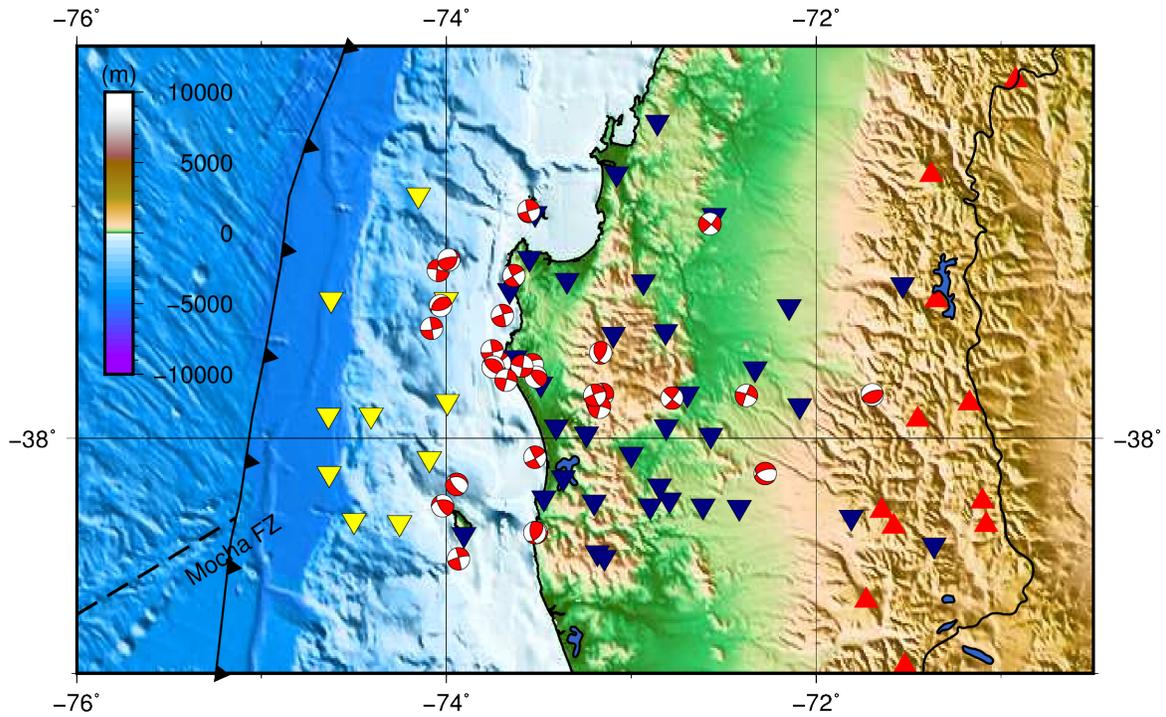


Figura 5.2: Localizaciones de las 32 soluciones finales de mecanismo focal producto del *re-picking* de los 58 eventos de características particulares. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio.

5.2.1. Grupo 1: Eventos superficiales con profundidad ≤ 9 km

De los 19 eventos superficiales, mediante el *re-picking* fue posible rescatar 12 soluciones de mecanismos focales asociadas. Pese a la minuciosa selección en las llegadas de polaridades de onda P, los diagramas obtenidos para aquellos 7 eventos restantes eran bastante parecidos a la figura 4.11(a) y fue imposible extraerles alguna solución. La distancia entre los eventos solucionados y la fosa varía en este grupo desde los 75 km (evento 4) hasta 135 km (evento 1).

N°	Evento	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	RMS
1	2010248122138	-38.0809	-73.5210	005.34	151.37	87.42	9.67	0.31
2	2010252093516	-37.2313	-73.9865	007.33	22.74	31.61	36.26	0.28
3	2010254075955	-37.6899	-73.5910	005.20	101.49	80.95	4.26	0.22
4	2010256054612	-37.2772	-74.0438	008.24	279.95	85.79	9.08	0.22
5	2010257140359	-37.4296	-74.0322	007.62	226.57	37.70	64.96	0.27
6	2010258111802	-37.5273	-74.0797	008.57	351.08	89.13	-9.96	0.05
7	2010267060733	-38.2888	-74.0204	005.85	266.37	44.81	35.53	0.38
8	2010362031513	-38.5144	-73.9342	005.94	345.22	87.42	9.67	0.11
9	2010363065328	-38.1973	-73.9440	005.60	141.41	66.60	-68.12	0.30
10	2011036161137	-37.7506	-73.6769	004.38	12.91	87.42	9.67	0.21
11	2011038155405	-37.6941	-73.7474	008.64	296.42	30.38	80.08	0.22
12	2011040073631	-37.6244	-73.7526	008.91	351.08	89.13	-9.96	0.25

Cuadro 5.3: Detalles de las 12 soluciones (de un total de 19 eventos) de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC luego del *re-picking* para el 1^{er} grupo de sismos. Eventos ordenados por fecha de registro.

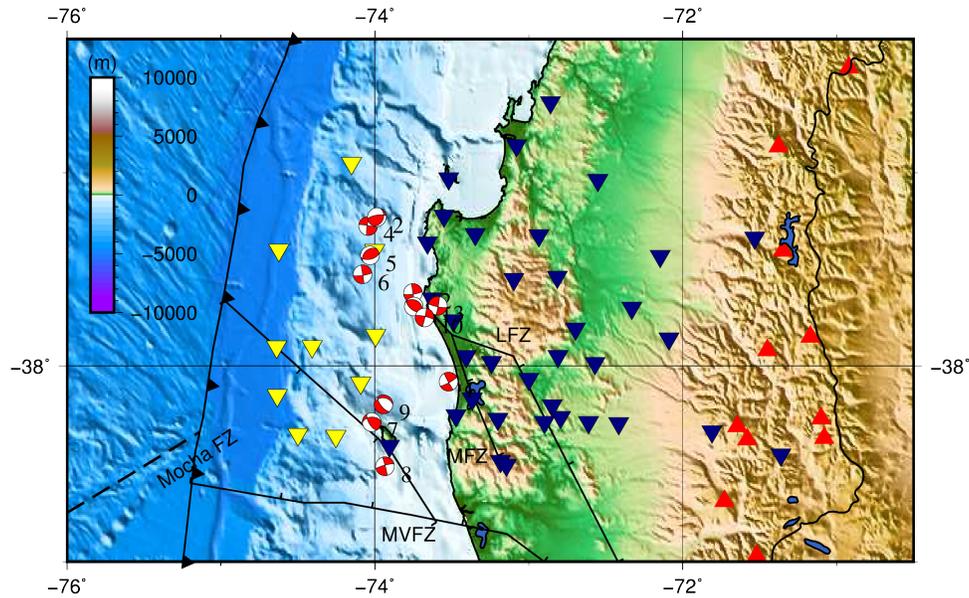


Figura 5.3: Localizaciones de las 12 soluciones finales de mecanismo focal producto del *re-picking* de los 19 eventos del grupo. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. Las líneas continuas representan las localizaciones aproximadas de las fallas de Lanalhue (LFZ), Morguilla (MFZ) y Mocha-Villarrica (MVFZ) basadas en el mapa geológico de la figura 3.1 perteneciente al trabajo de Melnick et al., 2009.

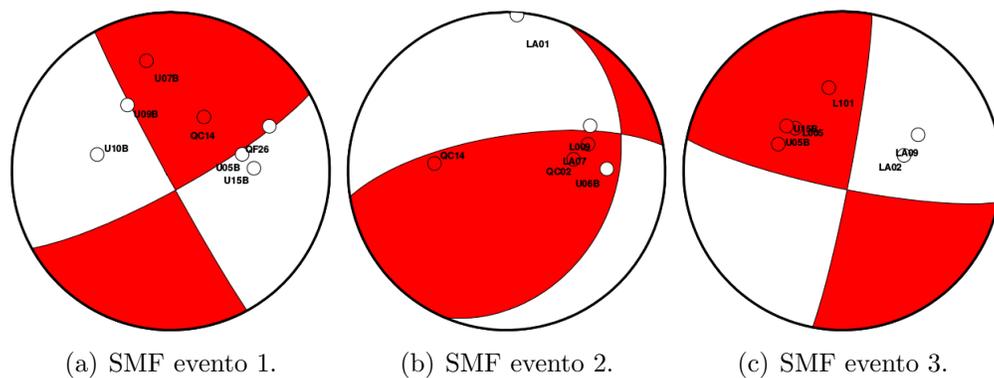


Figura 5.4: Diagramas *beachball* para eventos 1 al 3 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

Este grupo de eventos resultó ser del cual se obtuvieron más soluciones, aunque era de esperarse por ser el listado más grande de los cinco.

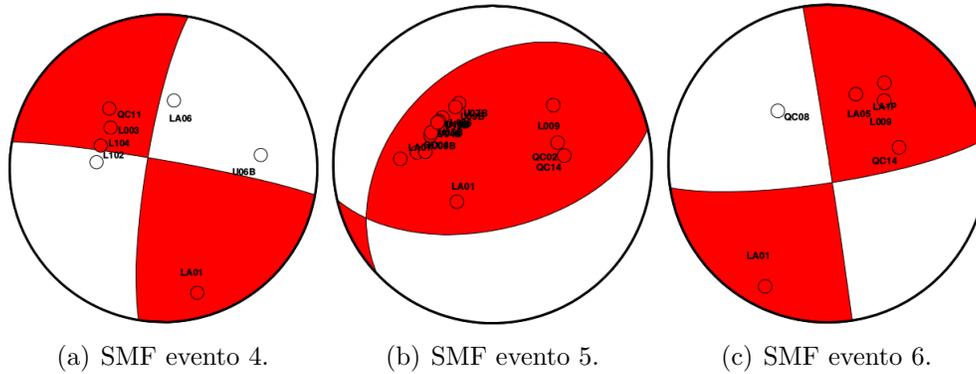


Figura 5.5: Diagramas *beachball* para eventos 4 al 6 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

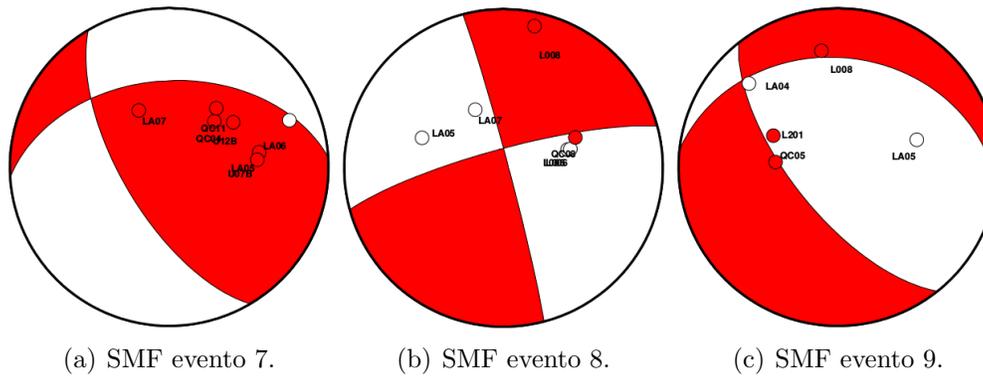


Figura 5.6: Diagramas *beachball* para eventos 7 al 9 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

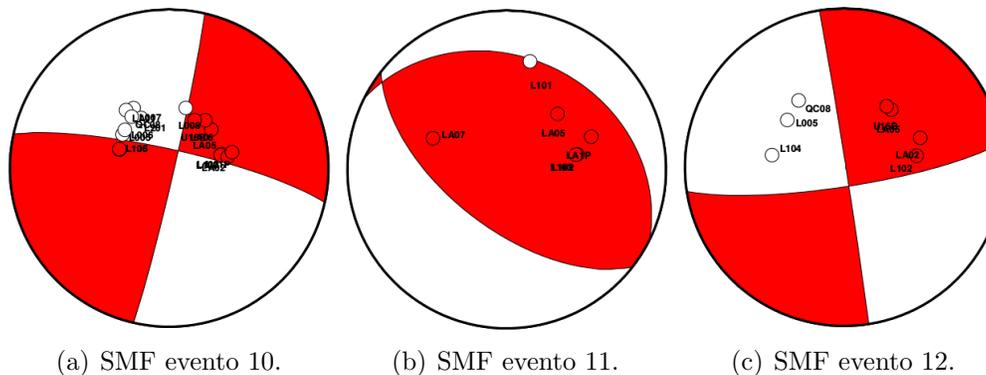


Figura 5.7: Diagramas *beachball* para eventos 10 al 12 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

5.2.2. Grupo 2: Eventos entre 125 y 142 km de la fosa (menor profundidad)

Manteniendo la idea de lo detallado en el grupo 1, esta vez lograron obtenerse apenas 4 soluciones luego del *re-picking* en un grupo de 10 eventos. Este grupo es el más pobre de la investigación en cuanto al porcentaje de soluciones con respecto al total del grupo se refiere (apenas un 40%). También cabe destacar que inicialmente no se obtenía ninguna solución y estas 4 SMF son producto directo del minucioso proceso de *re-picking*.

N°	Evento	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	RMS
1	2010322175320	-37.6839	-73.5354	016.79	122.18	41.41	-40.89	0.37
2	2010346062913	-37.7369	-73.5157	015.93	266.55	38.29	36.20	0.31
3	2011002234309	-38.4025	-73.5134	014.82	262.28	81.82	-5.78	0.17
4	2011003002759	-38.4030	-73.5214	013.28	168.85	56.17	53.00	0.36

Cuadro 5.4: Detalles de las 4 soluciones (de un total de 10 eventos) de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC luego del *re-picking* para el 2^{do} grupo de sismos. Eventos ordenados por fecha de registro.

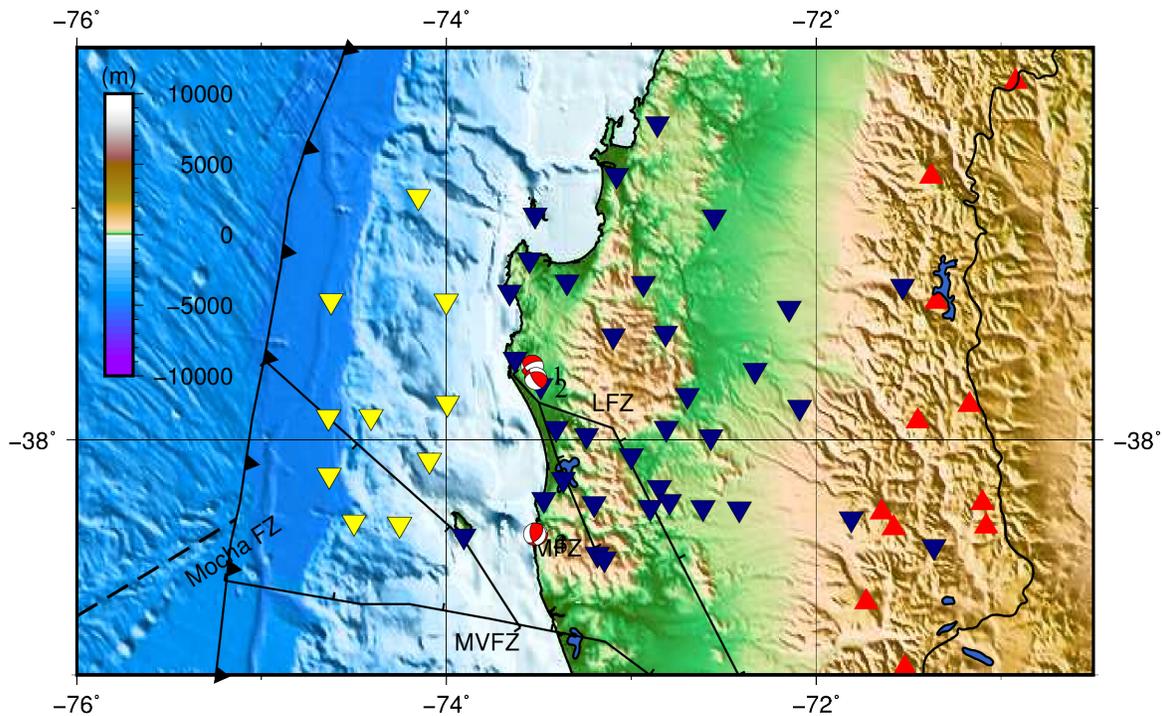


Figura 5.8: Localizaciones de las 4 soluciones finales de mecanismo focal producto del *re-picking* de los 10 eventos del grupo. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. Las líneas continuas representan las localizaciones aproximadas de las fallas de Lanalhue (LFZ), Morguilla (MFZ) y Mocha-Villarrica (MVFZ) basadas en el mapa geológico de la figura 3.1 perteneciente al trabajo de Melnick et al., 2009.

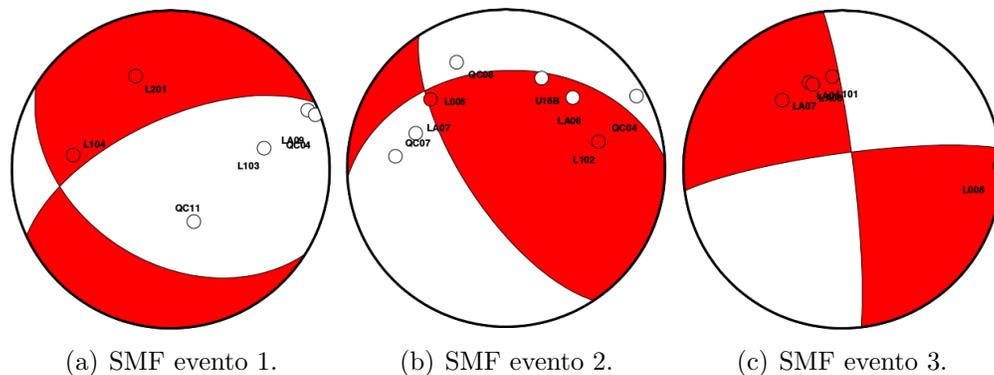


Figura 5.9: Diagramas *beachball* para eventos 1 al 3 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

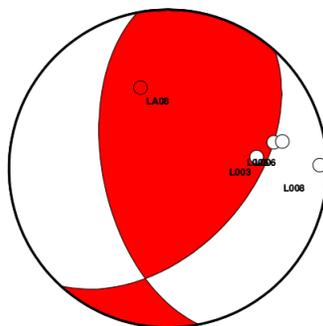


Figura 5.10: Diagrama *beachball* del evento 4 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

5.2.3. Grupo 3: Eventos con distancia a la fosa ≈ 100 km (mayor profundidad)

Esta vez el proceso de *re-picking* garantizó 5 soluciones de mecanismo focal en un grupo de 8 sismos registrados. Curiosamente es el único grupo que arrojó sólo soluciones de tipo *strike-slip* y todas cerca de la costa. La distancia entre los eventos solucionados y la fosa varía en este grupo desde los 108 km (evento 5) hasta 111 km (eventos 1 al 4).

N°	Evento	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	RMS
1	2011026182938	-37.6778	-73.7110	022.70	317.98	80.61	3.45	0.21
2	2010244114310	-37.0219	-73.5532	021.27	3.03	85.79	9.08	0.27
3	2010263012402	-37.2999	-73.6346	021.04	149.08	80.15	-1.75	0.05
4	2010250034955	-37.0188	-73.5540	019.85	164.31	80.04	0.88	0.35
5	2010252224516	-37.4722	-73.6968	018.62	343.13	82.95	7.11	0.04

Cuadro 5.5: Detalles de las 5 soluciones (de un total de 8 eventos) de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC luego del *re-picking* para el 3^{er} grupo de sismos. Eventos ordenados por fecha de registro.

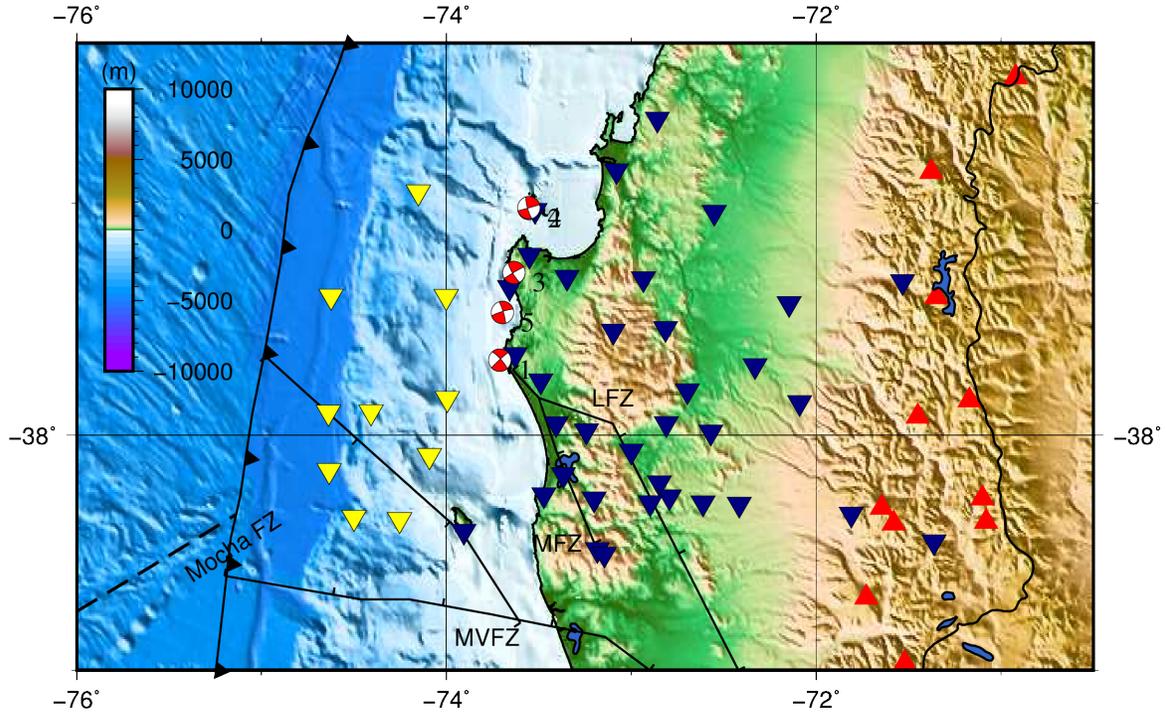


Figura 5.11: Localizaciones de las 5 soluciones finales de mecanismo focal producto del *re-picking* de los 8 eventos del grupo. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. Las líneas continuas representan las localizaciones aproximadas de las fallas de Lanalhue (LFZ), Morguilla (MFZ) y Mocha-Villarrica (MVFZ) basadas en el mapa geológico de la figura 3.1 perteneciente al trabajo de Melnick et al., 2009.

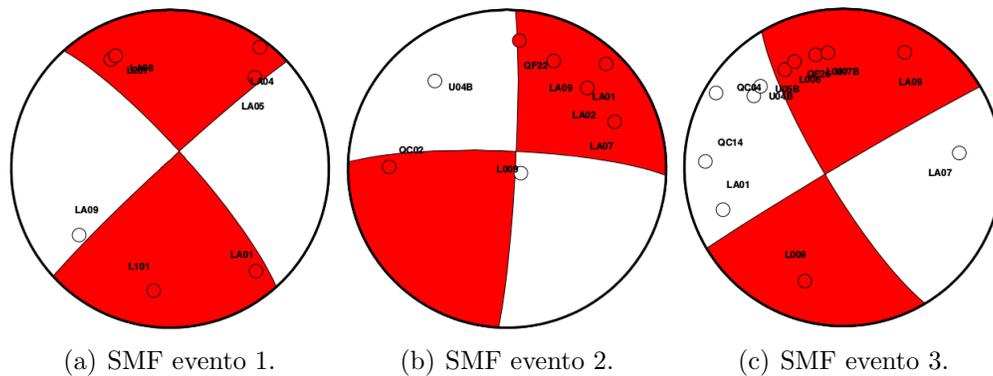


Figura 5.12: Diagramas *beachball* para eventos 1 al 3 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

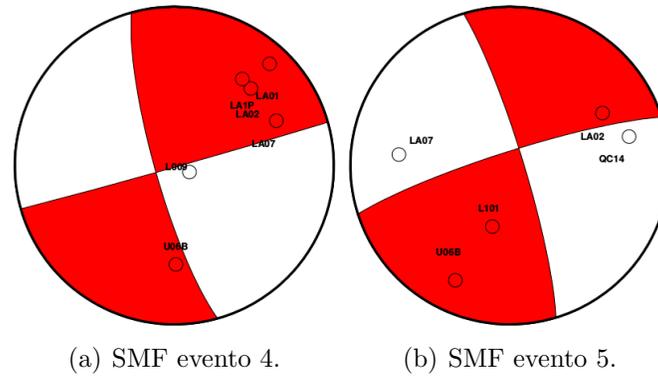


Figura 5.13: Diagramas *beachball* para eventos 4 y 5 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

5.2.4. Grupo 4: Eventos a más de 155 km de la fosa (probablemente sobre el slab)

Mediante el *re-picking* en este grupo se logró aumentar el número y mejorar la calidad de los eventos solucionados para así quedarnos con las SMF del 50% del grupo (7 eventos solucionados sin errores de polaridad permitido de un total de 14 eventos). Se caracteriza este grupo por albergar los sismos registrados a gran distancia de la fosa pero sin llegar al arco volcánico; siendo los eventos 5 y 6 los más cercanos a ella (158 km de distancia) y el evento 7 el más lejano (194 km).

N°	Evento	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	RMS
1	2010355215244	-37.8157	-73.1817	024.99	297.67	84.28	-8.22	0.32
2	2010250152940	-37.8467	-73.1826	023.52	192.00	80.04	0.88	0.34
3	2010242103647	-37.8114	-73.1554	023.05	348.23	63.94	-44.31	0.39
4	2010340090305	-37.8670	-73.1721	020.50	12.91	87.42	9.67	0.40
5	2010252214128	-37.8151	-73.1975	019.83	159.20	84.28	-8.22	0.25
6	2010296222830	-37.6329	-73.1650	018.32	156.08	44.81	44.81	0.33
7	2010260090312	-37.0755	-72.5744	036.04	41.05	80.61	3.45	0.34

Cuadro 5.6: Detalles de las 7 soluciones (de un total de 14 eventos) de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC luego del *re-picking* para el 4^{to} grupo de sismos. Eventos ordenados por fecha de registro.

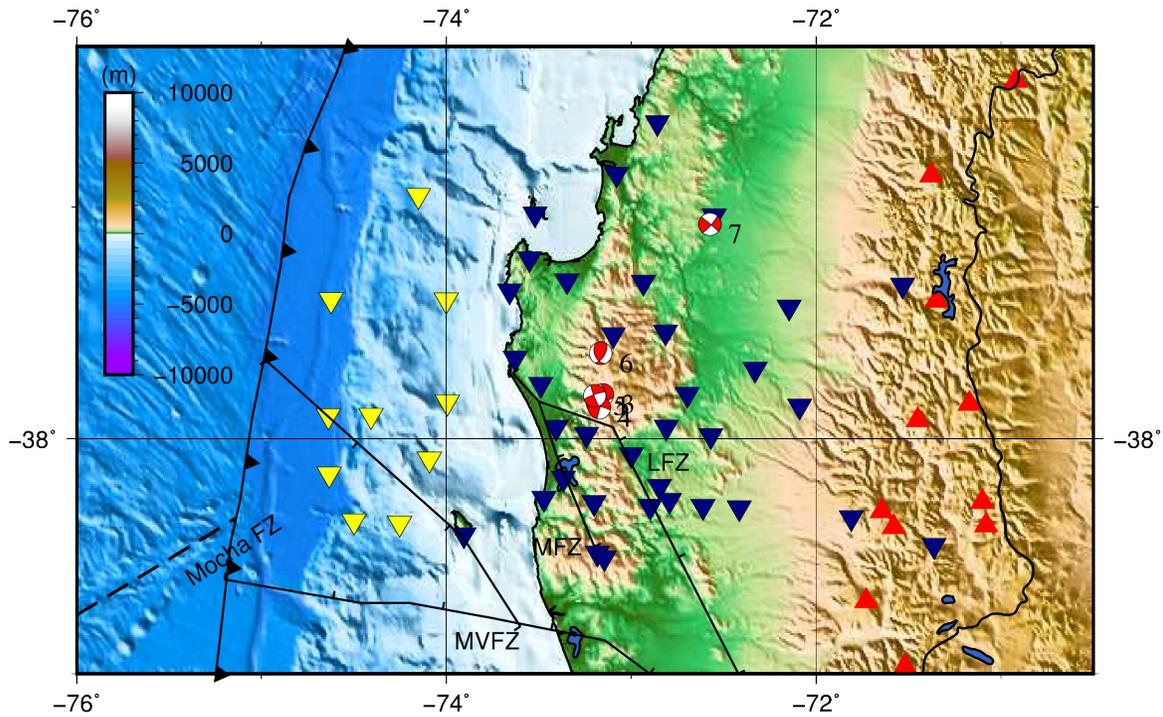


Figura 5.14: Localizaciones de las 7 soluciones finales de mecanismo focal producto del *re-picking* de los 14 eventos del grupo. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. Las líneas continuas representan las localizaciones aproximadas de las fallas de Lanalhue (LFZ), Morguilla (MFZ) y Mocha-Villarrica (MVFZ) basadas en el mapa geológico de la figura 3.1 perteneciente al trabajo de Melnick et al., 2009.

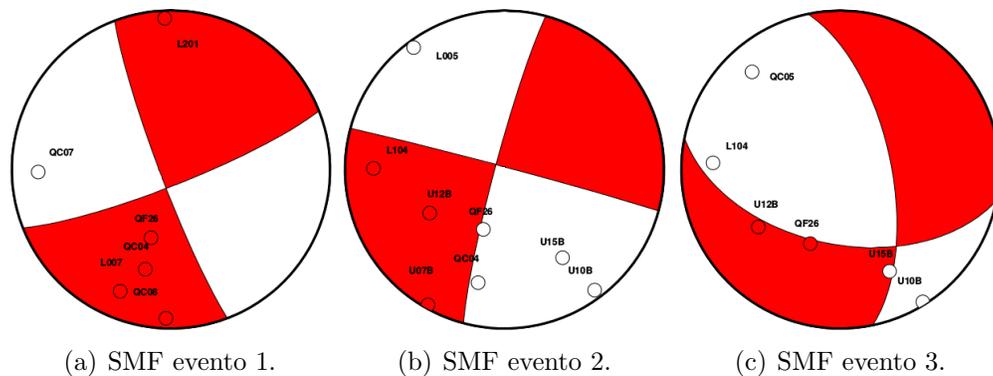


Figura 5.15: Diagramas *beachball* para eventos 1 al 3 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

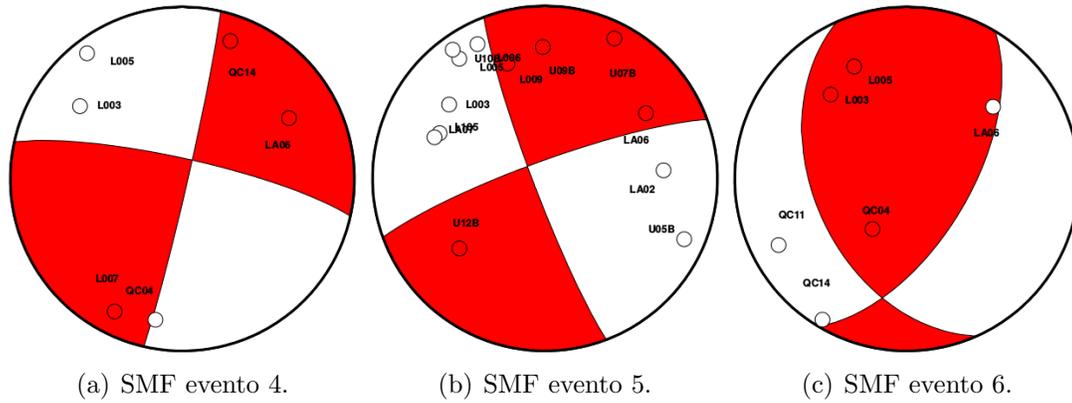


Figura 5.16: Diagramas *beachball* para eventos 4 al 6 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

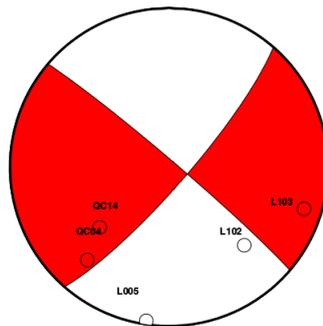


Figura 5.17: Diagrama *beachball* del evento 7 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

5.2.5. Grupo 5: Eventos con profundidad ≥ 50 km

En este grupo están los eventos más profundos y al mismo tiempo más alejados de la fosa. Se solucionaron 4 eventos de un total de 7 sismos registrados, quedando el evento 1 como el más profundo y al mismo tiempo el más alejado de la fosa (80.48 km de profundidad y 289 km de distancia a la fosa). El menos profundo resultó ser el evento 4 (52.24 km) y el más cercano a la fosa fue el evento 2 (195 km).

N°	Evento	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	RMS
1	2010259102414	-37.8127	-71.6961	080.48	70.00	25.00	90.00	0.29
2	2010326182950	-37.8274	-72.7801	059.79	131.56	84.28	8.22	0.26
3	2010240043925	-37.8163	-72.3773	056.29	199.72	86.60	-9.41	0.27
4	2010325034612	-38.1508	-72.2755	052.24	122.05	38.29	-47.00	0.30

Cuadro 5.7: Detalles de las 4 soluciones (de un total de 7 eventos) de mecanismo focal entregadas mediante FOCMEC luego del *re-picking* para el 5^{to} grupo de sismos. Eventos ordenados por fecha de registro.

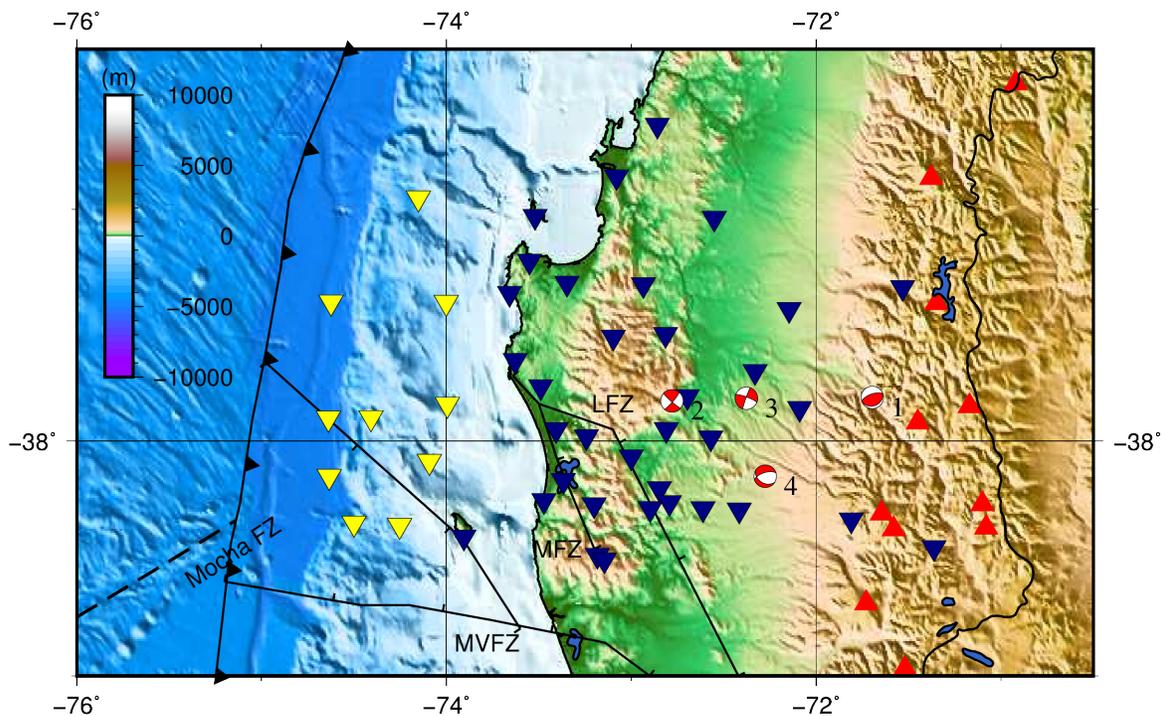


Figura 5.18: Localizaciones de las 4 soluciones finales de mecanismo focal producto del *re-picking* de los 7 eventos del grupo. En el mapa también se muestran las estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (triángulos invertidos amarillos), la red IMAD (triángulos invertidos azul oscuro), el arco volcánico (triángulos rojos) y una escala de colores referentes a la topografía de la zona de estudio. Las líneas continuas representan las localizaciones aproximadas de las fallas de Lanalhue (LFZ), Morguilla (MFZ) y Mocha-Villarrica (MVFZ) basadas en el mapa geológico de la figura 3.1 perteneciente al trabajo de Melnick et al., 2009.

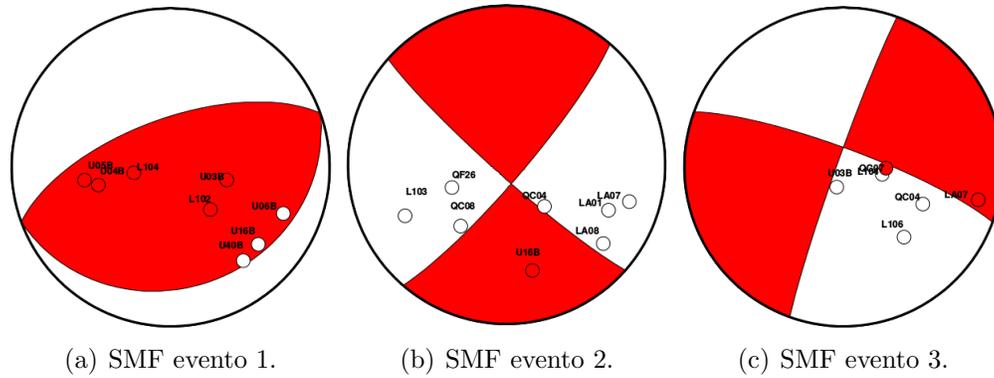


Figura 5.19: Diagramas *beachball* para eventos 1 al 3 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

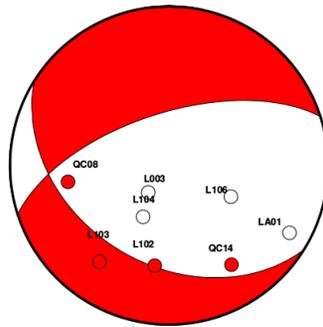


Figura 5.20: Diagrama *beachball* del evento 4 del grupo. Se aprecia la posición de las estaciones con respecto al evento además de su polaridad P registrada.

Discusión y conclusiones

6.1. Discusión

Habiéndose logrado la automatización del proceso, se vio cumplido el objetivo principal. Se dice que es propio de los seres humanos optar por lo más difícil antes de tomar una decisión, pero no es ese el motivo del porqué las soluciones obtenidas desde FOCMEC en este estudio deberían ser más fiables que las SMF propuestas por científicos que trabajaron antes en la zona de estudio. Claramente la cantidad de cuidados y procesos que requiere el programa para entregar soluciones hace que estas tengan un mayor peso en relación a otros diagramas de pelota de playa obtenidos mediante programas de determinación de SMF que requieren menores parámetros para funcionar.

El mecanismo número 6 del grupo 4 presenta una solución cortical (18.32 km de profundidad) de tipo *thrust* (ver sección 5.2.4 de los resultados). Según el diagrama de la figura 3.3, el trabajo de Melnick et al., 2009 permite hacernos la idea de que geográficamente aquella solución nuestra podría pertenecer a un evento sísmico relacionado con la falla Lanalhue (considerando que la gráfica de la LFZ presente en la figura 5.2.4 es una aproximación a las gráficas del mapa geológico de Melnick et al., 2009 presente en la figura 3.1) al igual que la SMF asociada al terremoto de Valdivia en 1960 (35 km de profundidad). A pesar que ambos sismos estarían situados en la misma falla y no se localizaron a grandes profundidades, se comprende que el terremoto de Valdivia se encontraría en la región interplaca a diferencia de nuestro evento. De todos modos, una solución como la que encontramos podría apoyar lo expuesto por Melnick et al., 2009 al proponer que mecanismos inversos tienen lugar en la falla de Lanalhue a ≈ 160 km de la fosa y a profundidades menores a 40 km.

El mapa geológico mencionado (ver figura 3.1) muestra un diagrama del camino de la falla Morguilla. Una de nuestras soluciones (específicamente la SMF 2 del grupo 2 con profundidad de 15.93 km mostrada en la figura 5.8) puede relacionarse con esa falla según el mapa geológico, presentando un comportamiento inverso con componente oblicua, tal y como habían señalado estudios anteriores en la zona para eventos de ese rango de profundidades (Bruhn, 2003; Haberland et al., 2006). A propósito del mismo

mapa geológico, el evento número 4 del grupo 2 (13.28 de profundidad) también presenta características inversas con componente oblicua, además de estar relacionado con la misma falla según propone el mapa geológico y el estudio de Melnick et al., 2009. Nuevamente podríamos estar de acuerdo con lo que propusieron aquellos investigadores en su trabajo y lo entregado por el nuestro.

La solución número 8 del grupo 1 (5.94 km de profundidad) está localizada poco al sur de Isla Mocha (ver figura 5.3) donde según el trabajo de Hicks y Rietbrock (2015) tiene lugar la MVFZ. Hicks en su trabajo mostró que eventos muy superficiales (profundidad menor a 10 km) en esa zona mostraban comportamiento strike-slip que se iba haciendo oblicuo mediante aumentaba la profundidad, permitiendo que nuestra solución se adapte totalmente a ese criterio.

Con respecto a lo expuesto por Melnick et al., 2006 acerca del comportamiento tipo *thrust* que presentaban mecanismos asociados a sismos localizados en Isla Santa María (ISM) y de la presencia de fallas normales en esa zona, sólomente pudo obtenerse un mecanismo de tipo normal con componente oblicuo localizado en la isla (ver imagen 5.1) para corroborar lo expuesto por el científico cuando obtuvimos nuestros primeros resultados. Aquellos primeros resultados consideraban el total de 505 eventos de la base de datos, donde lamentablemente ese mecanismo no formó parte de ninguno de los 5 grupos seleccionados y no se sometió a *re-picking* para probar su calidad; así, a pesar de haber sido la solución acorde a lo que decía el estudio, no podemos argumentar al respecto. Finalmente, algo parecido pasó con la corroboración de soluciones de tipo strike-slip dextral a lo largo de la falla Liquiñe-Ofqui (Melnick et al., 2009), donde nuestras redes localizaron muy pocos eventos en relación a la mayor densidad de sismos cercanos a la costa, siendo esto una característica directa del catálogo sísmico y la razón por la cual ni siquiera se ha tomado el cuidado de graficar la falla de Liquiñe-Ofqui en los mapas.

Aunque no se alcanzó a corroborar todas las soluciones postuladas por los científicos previamente mencionados, contamos ahora con un código que trabaja automáticamente y sólo bastará asegurar un buen *re-picking* a los eventos que no analizamos para así continuar investigando a futuro. Será un trabajo delicado pero con resultados muy interesantes.

6.2. Conclusiones

En conclusión, la automatización de la determinación de mecanismos focales mediante FOCMEC (Snoke, 2009) fue totalmente posible, aunque no en todos los casos se obtuvieron soluciones esperadas conforme a la localización de los eventos en cuestión. Muy importante es recalcar que la SMF final para cada evento depende de varias propiedades, sin embargo hay 2 que son las más importantes: Primero, el catálogo sísmico (características obtenidas de los eventos en sí desde su localización) y segundo, la correcta selección de polaridades y tiempos de llegada desde el picking realizada por el

investigador.

Se mostró en los resultados que de un total de 505 eventos se obtuvieron sólomente 43 soluciones y esto se debió directamente a no haber considerado en la selección de las llegadas de fases P que influiría la polaridad de las marcas para obtener SMF. Si desde un principio el picking se hubiera enfocado en rescatar también las polaridades de primeras llegadas P, de seguro no habríamos tenido que reducir esos 505 eventos a 58 con características particulares y hubiéramos tenido una gama de soluciones bastante considerable en relación a nuestras 32 soluciones finales. De todos modos, aquellas soluciones obtenidas permiten corroborar lo que han postulado algunos de los científicos con respecto a mecanismos focales presentes en las zonas de estudio, además de permitir aprovechar nuestras soluciones para realizar investigaciones futuras. Al quedar el código totalmente automatizado entonces podrán seguirse analizando los eventos de la base de datos para que a través del minucioso proceso de *re-picking* se obtengan las soluciones que no pudimos obtener por reducción de los eventos de interés (como buscar mecanismos para los sismos circundantes a Isla Santa María); era elemental encontrar soluciones suficientes para poder emitir juicios de su valorización y acabar esta investigación en un semestre como corresponde una habilitación profesional.

Se concluye también que si nos referimos directamente a la automatización del proceso, para confiar en las soluciones es necesario contar con una buena distribución de estaciones alrededor del evento localizado, además del menor gap posible.

Para finalizar, quisiera mencionar es que no se habló durante todo el documento que la red de estaciones OBS de la Universidad de Liverpool (marinas) contaban con un hidrófono (canal BHP) que ayudó en la localización sísmica. En esta investigación aquello ni siquiera se mencionó puesto que esas estaciones están ubicadas sobre montones de sedimentos donde se atrapa bastante la energía (sobretudo horizontal) y hace imposible que aquel canal nos pueda entregar un tipo de información en cuanto a polaridad se refiera.

Referencias

- Ammon, C. J. (2001). *The Rotation of Vectors and Tensors*. Penn State University, Pennsylvania, United States of America.
- Azúa, K. (2017). *Tomografía Sísmica en la vecindad de la península de Arauco a partir de las réplicas del terremoto del Maule Mw 8.8 de 2010 (tesis de pregrado)*. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Barrientos, S. E., Stein, R. S., and Ward, S. N. (1987). Comparison of the 1959 Hebgen Lake, Montana and the 1983 Borah Peak, Idaho, earthquakes from geodetic observations. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 77, 784-808.
- Bruhn, C., (2003). *Momententensorenhochfrequenter Ereignisse in Südchile* (Ph.D. thesis). Potsdam, University of Potsdam, 181 p.
- Buforn, E., Pro, C. (2006). *Mecanismo focal y sismotectónica, aportación de Agustín Udías*.
- Campos, J., D. Hatzfeld, R. Madariaga, G. López, E. Kausel, A. Zollo, G. Iannaccone, R. Fromm, S. Barrientos, and H. Lyon-Caen (2002). A seismological study of the 1835 seismic gap in south-central Chile. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 132 (1-3), 177-195.
- Crotwell, H. P., Owens, T. J. & Ritsema, J. (1999). The TauP Toolkit: Flexible seismic travel-time and ray-path utilities, *Seismological Research Letters* 70, 154-160.
- Crotwell, H. P. & Owens, T. J. (2016). *The TauP Toolkit: Flexible Seismic Travel-Time and Raypath Utilities*. Department of Geological Sciences, University of South Carolina.
- Glodny, J., Echtler, H., Collao, S., Ardiles, M., Burón, P., Figueroa, O. (2008). Differential Late Paleozoic active margin evolution in South-Central Chile (37°S-40°S) - The Lanalhue Fault Zone. *Journal of South American Earth Sciences*, 26, 4, 397-411.

- Haberland, C., Rietbrock, A., Lange, D., Bataille, K., Hofmann, S. (2006). Interaction between forearc and oceanic plate at the south-central Chilean margin as seen in local seismic data. *Geophys. Res. Lett.*, 33.
- Hicks, S. P., Rietbrock, A., Ryder, I., Lee, C.S. & Miller, M. (2014). Anatomy of a megathrust: The 2010 M8.8 Maule, Chile earthquake rupture zone imaged using seismic tomography, *Earth Planet. Sci. Lett.* , 405, 142–155.
- Hicks S. P. & Rietbrock A. (2015). Seismic slip on an upper-plate normal fault during a large subduction megathrust rupture. *Nat. Geosci.* 8, 955–960.
- Jost, M. L., and Herrmann, R. B. (1989). A Student's Guide to and Review of Moment Tensors *Seismological Research Letters*. v. 60, p. 37-57
- Kennett, B. L. N. and Engdahl, E. R. (1991) *Traveltimes for Global Earthquake Location and Phase Identification*. *Geophysical Journal International*, 105, 429-465.
- Kennett, B. L. N., E. R. Engdahl, and R. Buland (1995). Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophys. J. Int.*, 122, 108-124.
- Kissling, E., Ellsworth, W. L., Eberhart-Phillips, D. & Kradolfer, U. (1994). Initial reference models in local earthquake tomography. *J. Geophys. Res.*, 99, 19635-19646.
- Krawczyk, C. M., Mechie, J., Lüth, S., Tašárová, Z., Wigger, P., Stiller, M., Brasse, M., Echtler, H. P., Araneda, M., Bataille, K. (2006). Geophysical signatures and active tectonics at the South-Central Chilean margin *The Andes Active Subduction Orogeny*. Springer, New York, pp. 171-192.
- Lange, C. D., Tilmann, F., Barrientos, S. E., Contreras-Reyes, E., Methe, P., Moreno, M., Heit, B., Agurto, H., Bernard, P., Vilotte, J.-P., Beck, S. (2012): Aftershock seismicity of the 27 February 2010 Mw 8.8 Maule earthquake rupture zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 317-318, pp. 413–425.
- Lomnitz C., 2004. Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters*, 75, 3, 368-378.
- Manea, V.C., Leeman, W.P., Gerva, T., Manea, M. Zhu, G.Z., (2014). Subduction of fracture zones controls mantle melting and geochemical signature above slabs, *Nat. Commun.*, 5.
- Melnick, D., Bookhagen, B., Echtler, H. P. & Strecker, M. R. (2006). Coastal deformation and great subduction earthquakes, Isla Santa Maria, Chile (37° S). *Bull. Geol. Soc. Am.* 118, 1463–1480.
- Melnick, D., Bookhagen, B., Strecker, M. R. & Echtler, H. P. (2009). Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of years, Arauco peninsula, Chile. *J. Geophys. Res.* 114, B01407.

- Melnick, D., Moreno, M., Motagh, M., Cisternas, M. & Wesson, R. L. (2012). Splay fault slip during the Mw 8.8 2010 Maule Chile earthquake. *Geology* 40, 251–254.
- Melnick, D., Cisternas, M., Moreno, M. & Norambuena, R. (2012). Estimating coseismic coastal uplift with an intertidal mussel: Calibration for the 2010 Maule, Chile earthquake (Mw = 8.8). *Quat. Sci. Rev.* 42, 29–42.
- Moernaut, J. (2010). Sublacustrine landslide processes and their paleoseismological significance: Revealing the recurrence rate of giant earthquakes in south-central Chile, PhD thesis, Ghent University, Ghent, Belgium.
- Moreno, M.S., Klotz, J., Melnick, D., Echtler, H., Bataille, K., (2008). Active faulting and heterogeneous deformation across a megathrust segment boundary from GPS data, south central Chile (36 – 39°S). *Geochem. Geophys. Geosyst.* 9.
- Moreno, M., Rosenau, M., Oncken, O. (2010). 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature* 467, 198 – 202.
- Moreno, M., Melnick, D., Rosenau, M., Baez, J., Klotz, J., Oncken, O., Tassara, A., Chen, J., Bataille, K., Bevis, M., Socquet, A., Bolte, J., Vigny, C., Brooks, B., Rider, I., Grund, V., Smalley, B., Carrizo, D., Bartsch, M., Hase, H. (2012). Toward understanding tectonic control on the Mw 8.8 2010 Maule Chile earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 321-322, pp. 152—165.
- Moreno, M., Haberland, C., Oncken, O., Rietbrock, A., Angiboust, S., Heidbach, O. (2014). Locking of the Chile subduction zone controlled by fluid pressure before the 2010 earthquake *Nat. Geosci.*, 7 (2014), pp. 292-296.
- Nippres, S. E. J., Rietbrock, A. & Heath, A. E. (2010). Optimized automatic pickers: application to the ANCORP dataset. *Geophysical Journal International*, 181, 911-925.
- Ozacar, A. A., Beck, S. L. (2004). Crustal structure and seismic anisotropy near the San Andreas Fault at Parkfield, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94 (6B), S278-S292, 2004, 57.
- Scholz, C. H. (2002). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, 2nd ed., 471 pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Schwarze, H. (2016). Modelación numérica de tres tsunamis generados por deslizamientos de tierra submarinos en el talud continental frente a la Península de Arauco (tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Snoke, J. A. (1989). Earthquake Mechanisms, *Encyclopedia of Geophysics* (D. E. James, Ed.), Van Nostrand Reinhold Company, New York, 239-245.

- Snoke, J. A. (2009). FOCMEC: FOCal MECanism Determinations. Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA.
- Stein, S., & Wysession, M. (2003). An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. Hong Kong: Graphicraft Limitada.
- Tebbens, S. F. & Cande, S. C. (1997). Southeast Pacific tectonic evolution from early Oligocene to Present. *Journal of Geophysical Research* 102.
- Universidad Complutense de Madrid (2013). Terremoto de Jaén. Recuperado de: <http://www.igeo.ucm-csic.es/mobile/es/igeo/noticias/186-igeoquiz-terremoto-de-ja%C3%A9n>.
- Wang, K., He, J., (2008). Effects of frictional behavior and geometry of subduction fault on coseismic seafloor deformation. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 98 (2), 571 – 579.

En el anexo incluiremos los scripts automatizados que hicieron posible esta investigación y las funciones a llamar para correr el código. También se explicará de manera general el uso de los ejecutables, por ser interactivos y tener condiciones para trabajar.

Para el correcto funcionamiento, es importante ir corriendo los scripts en orden, puesto que siempre el siguiente necesitará parámetros de entrada que debieron ser obtenidos por el código anterior. El script automático que abarca todo el proceso con una sola orden, no es más que la unión de todos los demás códigos y algo de retoques para funcionar sin requerir argumentos al usuario. Aquella unión de códigos supera las 1000 líneas y es en esencia lo que ya nos dieron por separado; es por aquella razón que he decidido no adjuntarlo para no extender tanto el documento, pero se puede pedir al correo *crifernandez@udec.cl*.

La base de datos no se adjuntará por ser propiedad privada del Dr. Matt Miller y su equipo de trabajo.

7.1. `picking_ultimate.sh`

Se adjunta el script para poder realizar el picking. Se trata de un ejecutable en BASH de extensión `.sh`. La condición de funcionamiento es que debe estar dentro de la carpeta madre que contiene todos los eventos y los archivos con información de eventos y estaciones. El código automáticamente al ejecutarse ofrecerá una lista de los eventos en la carpeta y basta seleccionar el evento que queremos analizar.

Es importante que cuando el código consulte "*Desea cargar la llegada de ondas del archivo .pick ?*" debemos contestar que no (ingresando `n`), de lo contrario ocurriría un error. Eso pasa porque este script lo utilicé para otra investigación, sin embargo haciendo aquello funciona perfectamente.

7.1.1. Código del ejecutable

```

#! /bin/bash

#este script debe ejecutarse desde la carpeta donde tenemos el evento

#####
#APUNTE: llamar como el nombre de la carpeta
# stat="${PWD##*/}" #nombre de tu carpeta (la estacion)
#####

#for iteracion in `ls | grep 20[01] | awk '{print NR}'`; do
for i in `seq 1 10000`; do

echo ' '
more lista1.txt
echo ' '
echo "Ingrese de la lista el evento que desea pickear:"
read evento
echo ' '
echo "Nos vamos a la carpeta..."
cd ${evento}
echo ' '
#####
##### Cargaremos picaduras del que las hizo #####
#####
echo 'Desea cargar la llegada de ondas del archivo .pick ?'
echo 'CUIDADO: Esto solo debe hacerse una vez por evento (n/S).'
read respuesta

if [ $respuesta == S ]; then

#primero lo primero: Necesitamos el día Juliano "jday". Lo sacaremos jugando
#con el nombre de la carpeta:

####NECESITAMOS JULDAY EN EL BASHRC####

#fecha='echo "${PWD##*/}" | sed 's/-/ /g'| awk '{print $2, $3, $1}'
#julday ${fecha} > adem.txt
year='echo "${PWD##*/}" | awk '{print substr($1,1,4)}' #porsiacaso

#en adem.txt guardaremos el dia juliano, luego lo asignamos a una variable.

#Ahora dejaremos el puro numerito. Borraremos todo lo demas de "Julday"
jday='echo "${PWD##*/}" | awk '{print (substr($0,5,3))}'
#rm adem.txt
#Esta vez no tenemos el arhivo.pick como con Gonzalo. Sacaré todo direct-
#amente del .hpf.

filasP='more "${PWD##*/}".hpf | sed 'd' | awk '{print NR}' #La fila final no

for aux1 in ${filasP}; do

#Para cada fila, iremos rescatando las columnas JULIANO, hr, min, seg, cent.
arriveP='more "${PWD##*/}".hpf | awk '{ if (NR=='$aux1') print '$jday', ...
...$4, $5, $10, $11}'
#tomaremos la estacion registrada para tener marcada todas sus componentes
statP='more "${PWD##*/}".hpf | awk '{ if (NR=='$aux1') print $1}'

#Notese que ese IPD1 es para marcar la llegada no mas, picando lo cambiamos..
#KA sa el texto asociado con la primera marca A
#CUIDADO QUE LUEGO DEL "FIN" HAY UN ESPACIO!!!, ADEMÁS arriveP incluye juliano
sac <<EOF
rh *${statP}*.sac
ch A GMT ${year} ${arriveP}
ch KA IPD1
wh
quit

```

```

EOF
done
rm P.txt

#Y vamos a marcar las S:
more ${jday}.txt | awk '{if ($5=="S") print $0}' > S.txt
filasS='more S.txt | awk '{print NR}''

for aux2 in ${filasS}; do

arriveS='more S.txt | awk '{ if (NR=='$aux2') print $7, $8, $9, $10, $11}''
statS='more S.txt | awk '{ if (NR=='$aux2') print $1}''

#Notese que ese ESU2 es para marcar la llegada no mas, picando lo cambiamos..
#KTO sa el texto asociado con la primera marca TO
sac <<EOF
rh *${statS}*.sac
ch TO GMT ${year} ${arriveS}
ch KTO ES-1
wh
quit
EOF

done
rm S.txt

else

echo ' '
echo 'Okay, vamos directo al picking.'
echo ' '

fi

#####
##### Vamos al script picking de Kellen (modificado) #####
#####

#guarda el nombre de las estaciones (| grep -v "BHP") SEPARADOR DE CAMPOS "_"
for estacion in `ls -1 | grep sac | awk -F"_" '{print $2}' | sort -u ...
...| awk -F"." '{print $1}''; do
#guarda el nombre de las estaciones (| grep -v "BHP")

# para los corchetes a continuacion, recuerda que estan diciendo las
# posibles terminaciones del nombre en esa parte
# OJO CON EL FILTRO. HABLARE ESTO CON MATT...
sac << FIN
r *${estacion}*[BH]H[ENZ].sac
synch
qdp off
fileid on location ul
rtrend
rmean
taper
window 1 X 0.1 0.9 Y 0.1 0.9
title on text "Serie de tiempo sin filtrar" location top size medium
ppk perplot 3 markall on
wh
bp co 1 20 np 2
title on text "Serie de tiempo filtrada" location top size medium
ppk perplot 3 markall on
wh
quit
FIN
done
echo ' '
echo 'Ahora se muestran las señales no filtradas para confirmar el encabezado'
echo 'Presionar [ENTER] para continuar'

```

```

read pause
#queremos ahora solo los verticales
sac << FIN
r *[HN]Z.sac
synch
qdp off
fileid on location ul
ohpf picks.hpf
window 1 X 0.1 0.9 Y 0.1 0.9
title on text "Confirmar encabezado -h-" location top size medium
ppk perplot 3
wh
whpf
chpf
quit
FIN

#####
#####

#Con esto logro separar a partir de la 4ta columna como hora, minuto,
#segundo, centésima, llegada S.
carpeta='echo "${PWD##*/}"'
rm ${carpeta}.hpf
more picks.hpf | awk '{print $1, $2, $3, substr($4,0,2), substr($4,2,2), ...
... substr($0,20,2), substr($0,23,9), substr($0,32,2), substr($0,35,2), ...
..substr($0,37,4)}' > ${carpeta}.hpf
rm picks.hpf

# y el archivo .hpf quedó listo para usarse.
echo ' '
echo '**FIN**'
echo ' Archivo picks.hpf generado en esta carpeta.'
echo ' '
echo ' Presionar [ENTER] para volver a la carpeta de eventos.'
read pause
echo ' '

cd .. #volvemos a la carpeta inicial
done

```

7.2. ORDENAR_HPFS.sh

Este ejecutable consta de un arreglo de filas y columnas que debe correrse sólo una vez (si se aplica varias veces no causa problemas). Su función es ordenar los espacios de todos los archivos con extensión *.hpf* producto del *picking* dentro de las carpetas de los eventos, para así facilitar la extracción de información por los demás ejecutables. Corriéndolo una sola vez ordenará la salida del picking a la completa base de datos en tan sólo unos segundos.

7.2.1. Código del ejecutable

```

#!/bin/bash

#ESTE SCRIPT DEBERÍA CORRERSE DENTRO DE LA CARPETA DE LOS HPF

#Con esto logro separar a partir de la 4ta columna como hora, minuto,
# segundo, centésima, llegada S. Además manda cada .hpf a cada carpeta respectiva.

#Nos fuimos:

```

```

cd /home/cristian/Escritorio/MATT_EVENTS/HPF/

for event in `ls *.hpf | sed 's/.hpf//g'` ; do

#primero lo copiamos:
cp /home/cristian/Escritorio/MATT_EVENTS/HPF/${event}.hpf /home/cristian/ ...
... Escritorio/MATT_EVENTS/${event}/${event}.hpf

cd /home/cristian/Escritorio/MATT_EVENTS/${event}

#ahora lo ordenamos:
more ${event}.hpf | awk '{print $1, $2, $3, substr($4,0,2), ...
...substr($4,2,2), substr($0,20,2),substr($0,23,9), substr($0,32,2)...
..., substr($0,35,2), substr($0,37,4)}' > evento.hpf

#y con este truco quedan llamados como la carpeta respectiva:
rm ${event}.hpf
more evento.hpf > ${event}.hpf
rm evento.hpf

#y regresamos a la carpeta de .hpf :
cd /home/cristian/Escritorio/MATT_EVENTS/HPF/

done

echo " "
echo "archivos .hpf en su carpeta respectiva."
echo " "

```

7.3. *parametros.sh*

Este script es el que se encarga de coleccionar la mayoría de los parámetros necesarios para correr el evento en FOCMEC. Se vale de tener instalado Taup 2.4.1 y JULDAY (recordar el bonito curso de Linux, scripts y GMT). Este código también utiliza una función llamada *sphere.awk* que permite obtener los valores de azimuth y distancia evento-estación con precisión.

El funcionamiento en sí del código es similar al *picking_ultimate.sh* en el sentido que debe ubicarse en la carpeta madre para así al ejecutarse crear una lista de los eventos en la carpeta y dar a elegir cual queremos analizar.

7.3.1. Código del ejecutable

```

#!/bin/bash

# #MODIFICACIÓN DE SCRIPT PARA APLICARLA EN LA DATA DE MATT
# #####FALLA PARA ESTACIONES DE 3 LETRAS#####

#SCRIPT QUE RESCATA EL TAKE-OFF ANGLE, AZIMUTH, DISTANCIA Y POLARIDAD PARA CADA
#
#                               EVENTO Y ESTACION.
#Requiere :Taup 2.4.1
#           JULDAY en el .bashrc
#           seismic_catalog (en carpeta de eventos)
#           station_list (en carpeta de eventos)
#           sphere.awk (en carpeta de eventos)
#           Archivo picks.hpf generado para cada evento
#Funciona en esencia igual que THE_REAL_ULTIMATE_PICKING.sh y debe localizarse

```

```

#en la carpeta de eventos.                                     -by Ademar
#####

#direccion de la carpeta de modelos StdModels en TauP:
model_carp=/home/cristian/TauP-2.4.1/StdModels

#MODELO DE VELOCIDADES A UTILIZAR:
model=/home/cristian/TauP-2.4.1/StdModels/arauco.taup

for i in `seq 1 10000`; do
echo ' '
ls | grep 20[01]
echo ' '
echo "Ingrese de la lista el evento que desea extraer takeoff P,S y azimuth:"
read evento
echo ' '
echo "Nos vamos a la carpeta..."
cd ${evento}
echo ' '

#limpiaremos archivo anterior:
rm *_polaridad*.txt

#Para empezar, consideraremos solamente las estaciones del evento que registraron
#llegadas P :

jday=`echo "${PWD##*/}" | awk '{print (substr($0,5,3))}'`

#ALERTA DE MENOS DE 5 ESTACIONES CON CALIDAD 0:

auxiliar=`more "${PWD##*/}".hpf | grep [IE]P[-UD]0 | awk '{print ...
...(substr($1,0,5))}' | awk END'{print NR}'`
if [ ${auxiliar} -lt 5 ]; then
echo ' '
echo ' '
echo ' '
echo "MENOS DE 5 ESTACIONES CON LLEGADA P CALIDAD 0."
echo '(no es recomendable seguir con el análisis)'
echo ' '
echo 'Presione ENTER para salir'
echo ' '
read pause
echo 'FIN '
echo ' '
exit #el comando exit me saca del script
fi

#Y mostramos la lista de estaciones CON LLEGADAS P DE CALIDAD CERO:
more "${PWD##*/}.hpf | grep [IE]P[-UD]0 | awk '{print (substr($1,0,5))}' > P.txt

#Y obtenemos el numero (1, 2, 3...) de estaciones.
filasP=`more P.txt | awk '{print NR}'`

#Ahora comenzamos a trabajar estacion por estacion:
for aux1 in ${filasP}; do

statP=`more P.txt | awk '{ if (NR=='$aux1') print $1}'`

evento=`echo "${PWD##*/}"`

#Primero obtenemos la polaridad del picks.hpf: (variable entre comillas en sed)
#EPD1 por ejemplo.
polaridad=`more "${PWD##*/}.hpf | grep ${statP} | sed ...
...'s/'${statP}'//g' | awk '{print $1}'`

```

```

#suponiendo no tener carpetas con espacios en el nombre
even_dir='pwd'

#volvemos a la carpeta madre para extraer los parametros:

cd ..

##### Localizamos el evento (sin alterar signo): #####
evenlat='more velest*.txt | grep $evento | awk '{print $5}'
evenlon='more velest*.txt | grep $evento | awk '{print $6}'
evendepth='more velest*.txt | grep $evento | awk '{print $7}'
#####

#Ahora, obtendremos los parametros de la estación:
statlatlon='more info.dat | grep ${statP} | awk '{print $9, $10}'

#Ahora que tenemos todos los parametros podemos sacar distancia y AZIMUTH:
dist='echo ${evenlat} ${evenlon} ${statlatlon} | awk -f sphere.awk ...
...| awk '{print $1}'
azi='echo ${evenlat} ${evenlon} ${statlatlon} | awk -f sphere.awk ...
...| awk '{print $2}'

#NOS VAMOS A LA CARPETA DE MODELOS EN TAUP: Lamentablemente corre solo desde ahi.
cd ${model_carp}

#taup_time -mod ${model} -h ${evendepth} -ph p,P -km ${dist}

#read pause

Ptakeoff='taup_time -mod ${model} -h ${evendepth} -ph p,P,s,S -km ${dist} | ...
...awk '{if (NR==6) print $6}'
Stakeoff='taup_time -mod ${model} -h ${evendepth} -ph p,P,s,S -km ${dist} | ...
...awk '{if (NR==7) print $6}'
taup_time -mod ${model} -h ${evendepth} -ph p,P,s,S -km ${dist} >> aux.txt

cd ${even_dir}

#APLICAMOS CORRECCIONES AL TAKEOFF
#if [ "${Ptakeoff}" > "90" ]; then
#var1='echo ${Ptakeoff} | awk '{print $0-90}'
#Ptakeoff=$var1
#fi

#if [ "${Stakeoff}" > "90" ]; then
#var2='echo ${Stakeoff} | awk '{print $0-90}'
#Stakeoff=$var2
#fi

#y almacenamos los datos:
echo ${statP} ${dist} ${azi} ${Ptakeoff} ${polaridad} ${Stakeoff} >> ...
... stat_dist_azi_Ptakeoff_polaridad_Stakeoff.txt

done

rm P.txt

cd ..

echo ' '
echo 'Archivo stat_dist_azi_Ptakeoff_polaridad_Stakeoff.txt generado en ...
... carpeta del evento'
echo ' '
echo '*FIN*'
echo ' '

```

```
echo 'Presione ENTER para continuar'
read pause

done
```

La función *sphere.awk* debe también localizarse donde están todos los ejecutables.

7.3.2. Función *sphere.awk*

```
function pow(b, p)
{
    return b^p
}

{
    M_PI = 4*atan2(1,1)
    rad = 180 / M_PI
    lat1 = $1 / rad
    lat2 = $3 / rad
    lon1 = $2 / rad
    lon2 = $4 / rad
    latdif = lat1 - lat2
    londif = lon1 - lon2
    meanlat = (lat1 + lat2)/2

    a = 6377276.345
    b = 6356075.4131
    e = sqrt(((a*a)-(b*b))/(a*a))
    mrcurt = (a*(1-(e*e)))/pow((1-((e*e)*pow(sin(meanlat),2))),1.5)
    prcurt =a/sqrt(1-pow((e*sin(meanlat)),2))
    distance=sqrt((pow(londif*prcurt*cos(meanlat),2))+pow((latdif*mrcurt),2))/1000

    A=2*atan2(londif*((prcurt/mrcurt)*(cos(meanlat))),latdif)
    B=londif*(sin(meanlat))
    Az=(A-B)/2
    if(londif>0&&latdif<0) Az=Az+M_PI
    if(londif<0&&latdif<0) Az=Az+M_PI
    if(londif<0&&latdif>0) Az=Az+(2*M_PI)

    printf("%8.3f %6.2f\n", distance, Az*rad)
}
```

7.4. rotate_gcp.sh

Este es el código encargado de la rotación de sismogramas. Funciona interactivamente igual que los anteriores y tiene las mismas condiciones. La única novedad asociada es que ahora el código comienza a llamar a SAC.

7.4.1. Código del ejecutable

```
#!/bin/bash

#SCRIPT QUE CARGA DATOS DEL EVENTO AL HEADER Y ADEMÁS ROTA SISMOGRAMAS
# Se trabaja antes del RATLOG_VHS.
# Manda componentes N/E hacia radial/transversal.
# Corre dentro de la carpeta del evento.
# Trabaja estación por estación.

for i in `seq 1 10000`; do
```

```

echo ' '
ls | grep 20[01]
echo ' '
echo "Ingrese de la lista el evento que desea rotar a GCP:"
read evento
echo ' '
echo "Nos vamos a la carpeta..."
cd ${evento}
echo ' '

#Para empezar, consideraremos solamente las estaciones del evento que registraron
#llegadas P :

jday='echo "${PWD##*/}" | awk '{print (substr($0,5,3))}' '

#Y mostramos la lista de estaciones CON LLEGADAS P DE CALIDAD CERO:
more "${PWD##*/}.hpf | grep [IE]P[-UD]0 | awk '{print (substr($1,0,5))}' > P.txt

#Y obtenemos el numero (1, 2, 3...) de estaciones.
filasP='more P.txt | awk '{print NR}' '

#Ahora comenzamos a trabajar estacion por estacion:
for aux1 in ${filasP}; do

#Y ahora listará las estaciones
statP='more P.txt | awk '{ if (NR=='$aux1') print $1}' '
echo $statP

evento='echo "${PWD##*/}" '

#suponiendo no tener carpetas con espacios en el nombre
even_dir='pwd '

#volvemos a la carpeta madre para extraer los parametros:

cd ..

#Ahora en el header de los sismogramas incluiremos info. del evento:
##### Localizamos el evento (sin alterar signo): #####
evenlat='more hypo*.txt | grep $evento | awk '{print $5}' '
evenlon='more hypo*.txt | grep $evento | awk '{print $6}' '
evendepth='more hypo*.txt | grep $evento | awk '{print $7}' '
#####

#regresamos a carpeta del evento:
cd ${evento}

#Hora de almacenarla. Es necesaria para la rotación:
sac << END1
r *${statP}* [HB] [HN] [ZNE].sac
CHNHDR EVLA ${evenlat} EVLO ${evenlat} EVDP ${evendepth}
wh
quit
END1

#RECORDAR QUE TRABAJAMOS ESTACIONES CALIDAD CERO P.

#Ahora rotaremos los sismogramas asociados a la estación en ciclo:
# (lees primero el norte y luego el este)
# (en algunos casos se dice que no son componentes perpendiculares)
sac << END1
r *${statP}* [HB] [HN] [N].sac *${statP}* [HB] [HN] [E].sac
rotate to gcp
write ${statP}.r ${statP}.t
r ${statP}.r
chnhdr kcmpnm "RADIAL"
write over

```

```

r ${statP}.t
chnhdr kcmpnm "TRANSVERSAL"
write over
quit
END1

done

rm P.txt

cd ..

echo ' '
echo 'Sismogramas rotados. Componentes radial y transversal guardadas.'
echo ' '
echo '*FIN*'
echo ' '
echo 'Presione ENTER para continuar'
read pause

done

```

7.5. RATLOG_VHS.sh

Código encargado de calcular los valores de RATLOG. Funcionamiento idéntico y estructura bastante similar a *rotate_gcp.sh*. No requiere de nada extra en relación a los requerimientos de los scripts anteriores.

7.5.1. Código del ejecutable

```

#!/bin/bash

# #MODIFICACIÓN DE SCRIPT PARA APLICARLA EN LA DATA DE MATT

#SCRIPT QUE RESCATA EL RATLOG log(S/P) para cada estacion de cada evento
#
#Requiere que todos los demás scripts de parámetros hayan sido ejecutados.
#Funciona en esencia igual que THE_REAL_ULTIMATE_PICKING.sh y debe localizarse
#en la carpeta de eventos. -by Ademar
#####

for i in `seq 1 10000`; do

echo ' '
ls | grep 20[01]
echo ' '
echo "Ingrese de la lista el evento al que desea extraer maximas amplitudes:"
read evento
echo ' '
echo "Nos vamos a la carpeta..."
cd ${evento}
echo ' '

#porsiacaso lo re-ejecutamos, borraremos el anterior:
rm stat_amps.txt RATLOG*.txt SV_SH.txt

#Trabajaremos estación por estación de aquellas que "registraron" el evento. Me
#refiero a aquellas que les obtuvimos los demás parámetros, válgase.

for estacion in `more *polaridad*.txt | awk '{print $1}'`; do

```

```

#Para el caso de la P que está en A:
#(El length está ahí para asegurar que sea el mismo ciclo. Sólo VERTICALES.)

sac << END1
echo on
r *${estacion}*[HB][HN]Z.sac
mtw A 0 3
markptp to T7 length 0.5
lh user0
wh
quit
END1

#Ahora que te sales, vuelves a llamar el valor de la amplitud guardada en user0
#desde afuera de SAC:

P_amp='sac1st user0 f *${estacion}*[HB][HN]Z.sac | awk '{print $2}''

#Para el caso de la S (T0):

sac << END2
r *${estacion}*[HB][HN]Z.sac
mtw TO 1 4
markptp to T7 length 0.5
lh user0
wh
quit
END2

#Ahora que te sales, vuelves a llamar el valor de la amplitud guardada en user0
#desde afuera de SAC:

S_amp='sac1st user0 f *${estacion}*[HB][HN]Z.sac | awk '{print $2}''

##### OJO QUE ESTA VEZ NO CALCULAMOS S TEÓRICA #####

#y lo guardamos iterativamente:
echo ${estacion} ${P_amp} ${S_amp} >> stat_amps.txt

done

##### ASUMIENDO QUE YA HE ROTADO LOS SISMOGRAMAS #####

for estacion in `more *polaridad*.txt | awk '{print $1}'`; do

#Máxima amplitud RADIAL S, CORRESPONDE A SV
#Para el caso de la S (T0):
sac << END2
r ${estacion}.r
mtw TO 1 4
markptp to T7 length 0.5
lh user0
wh
quit
END2

#Ahora que te sales, vuelves a llamar el valor de la amplitud guardada en user0
#desde afuera de SAC:

SV='sac1st user0 f ${estacion}.r | awk '{print $2}''

#Máxima amplitud TRANSVERSAL S, CORRESPONDE A SH
#Para el caso de la S (T0):
sac << END2
r ${estacion}.t
mtw TO 1 4

```

```

markptp to T7 length 0.5
lh user0
wh
quit
END2

#Ahora que te sales, vuelves a llamar el valor de la amplitud guardada en user0
#desde afuera de SAC:

SH='sac1st user0 f ${estacion}.t | awk '{print $2}''

#y lo guardamos iterativamente:
echo ${estacion} ${SV} ${SH} >> SV_SH.txt

done

#####          RATLOG          #####

#Entendiéndose el RATLOG como log10(S/P) , haremos el arreglo en BASH por no haber
#función directa de log10      stat, RATLOG
more stat_amps.txt | awk '{print $1, log($3/$2)/log(10)}' | awk '{printf "%.4s ...
... %.6f\n", $1, $2}' > RATLOG.txt

paste stat_amps.txt SV_SH.txt | awk '{print $1, log($5/$2)/log(10)}' | sed ...
... 's/nan//g' | awk '{printf "%.4s %.6f\n", $1, $2}' > V.txt
paste stat_amps.txt SV_SH.txt | awk '{print $1, log($6/$2)/log(10)}' | sed ...
... 's/nan//g' | awk '{printf "%.4s %.6f\n", $1, $2}' > H.txt
more SV_SH.txt | awk '{print $1, log($2/$3)/log(10)}' | sed 's/nan//g' | awk ...
... '{printf "%.4s %.6f\n", $1, $2}' > S.txt

#Ahora crearé el archivo de RATLOG final: stat, RATLOG, V, H, S
paste RATLOG.txt V.txt H.txt S.txt | awk '{print $1, $2, $4, $6...
..., $8}' > RATLOG_VHS.txt

rm V.txt H.txt S.txt RATLOG.txt

echo ' '
echo 'Archivo stat_amps.txt, SV_SH.txt y RATLOG_VHS.txt generado ...
... en carpeta del evento'
echo ' '
echo 'Pulse ENTER para continuar...'
read pause
echo ' '

cd ..
done

```

7.6. input_create.sh

El arreglo maestro de filas y columnas, basado especialmente en el comando *printf*. Consta de las mismas condiciones para funcionar que los scripts ya mencionados. Considerando que FOCMEC fue escrito en FORTRAN 77, es inaceptable un elemento de más en el código aunque se trate de un espacio. Este ejecutable manda como salida a cada carpeta un archivo con el nombre de la carpeta más la extensión *.inp*, el cual será lo que ingresemos a FOCMEC.

7.6.1. Código del ejecutable

```

#!/bin/bash

# SCRIPT QUE CREA ARCHIVO .inp PARA FOCMEC
# Manda un archivo de salida con el nombre de la carpeta.inp
# Columnas: 1.- Estación
# 2.- Azimuth
# 3.- Takeoff con Polaridad (pegados)
# 4.- RATLOG
#

for i in `seq 1 10000`; do
echo ' '
ls | grep 20[01]
echo ' '
echo "Ingrese de la lista el evento al que extraer input para FOCMEC:"
read evento
echo ' '
echo "Nos vamos a la carpeta..."
cd ${evento}
echo ' '

echo " "
echo "Creando archivo de input para focmec..."
echo " "

carpeta="${PWD##*/}"

#Con el comando paste pegamos HORIZONTALMENTE los archivos:
#Ahora para obtener el input de focmec en printf:

rm ${carpeta}.inp

#para obtener la 2da columna:
paste *polaridad*.txt RATLOG*.txt | awk '{print $1, $3, $4substr($5,3,1), $7 }'...
... | awk '{printf "%.3i %.10s\n", $2, ".$$2}' | awk -F"." '{print $1"."$3}'|...
... sed "s/ //g" > col2.txt

#para obtener 3ra columna:
paste *polaridad*.txt RATLOG*.txt | awk '{print $1, $3, $4substr($5,3,1), $7 }'...
| awk '{printf "%.3i %.10s\n", $3, ".$$3}' | awk -F"." '{print $1"."$3}'| sed ...
... "s/ //g" > col3.txt

#código de imput final (le sacamos los ratlog=0 por espacios vacíos)
paste RATLOG*.txt col2.txt col3.txt | awk '{print $1" ", $6" ", $7," "$2}'...
... | sed 's/-/ -/g' | sed 's/ 0.000000//g'> temp1.txt

echo "Archivo de input para evento ${carpeta}" > temp2.txt

#ingresaré en una 5ta columna el takeoff S
#more *polaridad*.txt | awk '{print $6}' >> temp.txt

#paste temp1.txt temp.txt > temp3.txt

cat temp2.txt temp1.txt > ${carpeta}.inp

rm col*.txt temp*.txt

#pego linea de encabezado:
more ${carpeta}.inp | awk '{if (NR==1) print $0}' >> aux1.txt
#Ahora me falta repetir 3 veces el contenido de la línea:
for aux in `more ${carpeta}.inp | awk '{print NR}'`; do

```

```

#genérico P, sin ratlog
more ${carpeta}.inp | awk '{if (NR==(\'$aux'+1)) print $1, $2, $3}' >> aux1.txt
#tasa V
more ${carpeta}.inp | awk '{if (NR==(\'$aux'+1)) print $0}' >> aux1.txt
#tasa H
more ${carpeta}.inp | awk '{if (NR==(\'$aux'+1)) print $0}' >> aux1.txt
#tasa S
more ${carpeta}.inp | awk '{if (NR==(\'$aux'+1)) print $0}' >> aux1.txt

done

#Para recordar:
#if [ $V == "0.000000" ]; then echo "era cero poh lonyi";...
... else echo "aun no lo haces funcionar"; fi

#pego linea de encabezado:
more ${carpeta}.inp | awk '{if (NR==1) print $0}' >> aux2.txt
#Ahora adjunto los valores correspondientes a onda S:
for stat in `more *polaridad*.txt | awk '{print $1}'` ; do

V=`more RATLOG_VHS.txt | grep ${stat} | awk '{print $3}'`
H=`more RATLOG_VHS.txt | grep ${stat} | awk '{print $4}'`
S=`more RATLOG_VHS.txt | grep ${stat} | awk '{print $5}'`

#lo dejo en printf porque quiero. Daba igual, si de TauP venía con 2 decimales...
takeS=`more *polaridad*.txt | grep ${stat} | awk '{print $6}' |...
... awk '{printf "%5.2f\n", $1}'`

#HEY!! AL INGRESAR VARIABLES EN AWK NO RESPETA LOS CEROS A LA DERECHA DEL PUNTO!!
#(por eso le ingresaré ese "%" para cargarlo y luego lo borro. Listo.)

#Pondremos los respectivos STRINGS V, H y S al lado del takeoff RESPECTIVO:
more aux1.txt | grep $stat | awk '{if (NR==2) print $1, $2, $3}' >> aux3.txt
more aux1.txt | grep $stat | awk '{if (NR==2) print $1, $2, "'${takeS}'" "V"}' >> aux3.txt
more aux1.txt | grep $stat | awk '{if (NR==3) print $1, $2, "'${takeS}'" "H"}' >> aux3.txt
more aux1.txt | grep $stat | awk '{if (NR==4) print $1, $2, "'${takeS}'" "S"}' >> aux3.txt
#y sacamos el arreglo:
#more aux3.txt | sed 's/ //g'

#Vamos a saltarnos si los parámetros son cero:
if [ $S == "0.000000" ]; then

more aux3.txt | grep ${stat} | awk '{if (NR==1) print $0}' >> aux2.txt
more aux3.txt | grep ${stat} | awk '{if (NR==2) print $1, $2, $3}' >> aux2.txt
more aux3.txt | grep ${stat} | awk '{if (NR==3) print $1, $2, $3}' >> aux2.txt
more aux3.txt | grep ${stat} | awk '{if (NR==4) print $1, $2, $3}' >> aux2.txt

else

more aux3.txt | grep ${stat} | awk '{if (NR==1) print $0}' >> aux2.txt
more aux3.txt | grep ${stat} | awk '{if (NR==2) print $1, $2, $3, '$V''}' >> aux2.txt
more aux3.txt | grep ${stat} | awk '{if (NR==3) print $1, $2, $3, '$H''}' >> aux2.txt
more aux3.txt | grep ${stat} | awk '{if (NR==4) print $1, $2, $3, '$S''}' >> aux2.txt

fi

done

#COOPERÉ CON EL PRINT FORMAT. Hay que aplicarlo denuevo...

#tercera columna ordenada:
more aux2.txt | awk '{ if (NR>1) printf "%.3i %.10s\n", $3, "."$3}' ...
...| awk -F"." '{print $1"."$3}' | sed 's/ //g' > col3.txt
#segunda columna ordenada: (misma idea)

```

```

more aux2.txt | awk '{print $1, $2}' | awk '{ if (NR>1) printf "%.3i %.10s\n"...
..., $2, ".$2}' | awk -F"." '{print $1".$3}' | sed "s/ //g" > col2.txt
#primera columna:
more aux2.txt | awk '{ if (NR>1) print $1}' > col1.txt
#4ta columna:
more aux2.txt | awk '{ if (NR>1) print $4}' | sed 's/ -/ -/g' | ...
... sed 's/ 0.000000//g' | awk '{print " "$0}' | sed 's/ -/ -/g' > col4.txt

paste col1.txt col2.txt col3.txt col4.txt | awk '{print $1,"",$2,"", ...
...$3,"", $4}' | sed 's/ -/ -/g' > aux4.txt

#Le agregamos la primera linea de comentario:
echo "Archivo de input para evento ${carpeta} " > aux5.txt
#esta vez me falló el comando paste...
cat aux5.txt aux4.txt > ${carpeta}.inp

rm col*.txt aux*.txt

```

```

echo " "

echo " ${carpeta}.inp creado en carpeta del evento."

echo " "

echo "pulse ENTER para continuar"
read pause

cd ..

done

```

7.7. focmec_run.sh

Llamada a FOCMEC usando como argumentos los parámetros extraídos del archivo de input preparado por los scripts anteriores. Debe ubicarse en el mismo lugar de los demás scripts ya que también es interactivo. No se debe borrar ningún espacio dentro de la llamada a FOCMEC (en el código), de lo contrario jamás funcionará. Recordar la escritura del programa basada en FORTRAN77.

Este script entrega 2 archivos de salida como se detalla en la metodología. Ambos serán almacenados dentro de la carpeta del evento respectivo.

7.7.1. Código del ejecutable

```

#!/bin/bash

#SCRIPT QUE CORRE FOCMEC Y ARROJA ARCHIVOS DE SALIDA PARA PLOT GMT

#limpiamos primero:
#rm ${carpeta}.out

for i in `seq 1 10000`; do
echo ' '
ls | grep 20[01]
echo ' '
echo "Ingrese de la lista el evento que desea extraer parámetros FOCMEC:"

```

```

read evento
echo ' '
echo "Nos vamos a la carpeta..."
cd ${evento}
echo ' '

carpeta="${PWD##*/}"

#NO BORRAR NINGÚN ESPACIO A CONTINUACIÓN!!!!

focmec << END
${carpeta}.out
Archivo de salida focmec para evento ${carpeta}
${carpeta}.inp

```

1.78

END

NO ME FUNCIONAN LOS CONDICIONALES!!

#Ahora, mando la frase "There are no acceptable solutions" a un archivo de salida.

#Si el archivo está vacío es porque si tuve soluciones ...

rm aux

more focmec.lst | grep " There are no acceptable solutions" > aux

if [-s aux] ; then

echo " "

echo "NO SE OBTIENEN SOLUCIONES" #NO TUVE SOLUCIONES, CREAR LOOP...

echo "Probaremos permitiendo errores..."

echo " "

echo " Allowed P polarity errors..[0].....: 1"

echo " Number of allowed amp. ratio errors..[0].....: 1"

echo " "

echo "Pulsa ENTER para continuar"

read pause

echo ' '

rm aux

focmec << END

\${carpeta}.out

Archivo de salida focmec para evento \${carpeta}

\${carpeta}.inp

1

1.78

1

```

END

else

echo "Se obtuvieron soluciones sin errores permitidos."
echo "Pulsa ENTER para continuar"
read pause

fi

echo ' '
echo "Listos para proceder al plot."
echo ' '
echo 'Pulsa ENTER para continuar'
read pause
echo ' '

cd ..

done

```

7.8. six_plot_foc_mec.sh

Este script utiliza información de los dos archivos de salida generados en el proceso pasado para llamar a GMT y graficar las 6 soluciones con RMS más bajo en cuanto a tasas de polaridades se refiere. A pesar de que trabaja evento por evento, debe ubicarse donde están todos los demás por que es interactivo y funcionará con cualquier evento que haya obtenido soluciones desde FOCMEC, claramente.

7.8.1. Código del ejecutable

```

#!/bin/bash

#SCRIPT QUE PLOTEA LAS PRIMERAS 6 SOLUCIONES ARROJADAS POR FOCMEC

stat_name=1

for i in `seq 1 10000`; do
echo ' '
ls | grep 20[01]
echo ' '
echo "Ingrese de la lista el evento que desea plotear SMF:"
read evento
echo ' '
echo "Nos vamos a la carpeta..."
cd ${evento}
echo ' '

```

```

#Para saltarnos el problema del non-ASCII:
cat focmec.lst | strings -n 8 > moo.txt
rm focmec.lst
cat moo.txt > focmec.lst
rm moo.txt

carpeta="${PWD##*/}"

gmtset MAP_FRAME_TYPE plain

#PLOT DE LA PELOTA Y ESTACIONES A PARTIR DE focmec.lst

#tamaño de letra:
size=7

#####
##### PRIMERA PELOTA #####

#-X-8 -Y0
#-X11 -Y19
#create the projection.
psbasemap -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -X11 -Y19 -B0g0 -P -K > focmec.ps
#-B361g10 para estereografica!!
#shove focal mechanism onto the projection
#example from salida.out

carpeta="${PWD##*/}"

#PRIMERA SOLUCIÓN: NR==11 ; SEGUNDA SOLUCIÓN: NR==12 ; TERCERA SOLUCIÓN: NR==13

more ${carpeta}.out | awk 'if (NR>14) print $0}' | sort -k8 > temp1.dat

dip='more temp1.dat | awk 'if (NR==1) print $1}'
strike='more temp1.dat | awk 'if (NR==1) print $2}'
rake='more temp1.dat | awk 'if (NR==1) print $3}'

#-Sa is Aki/Richards format
#1,2: longitude, latitude of event (-: option interchanges order) 3: depth of
#event in kilometers 4,5,6: strike, dip and rake in degrees 7: magnitude 8,9:
#longitude, latitude at which to place beach ball.

psmeqa -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sa${size}c -O -B -Gred -K << END >> focmec.ps
0 -90 0 ${strike} ${dip} ${rake} 5 0 0
END

#plot the station positions on the plot
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
...print $1}'`; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == ...
... "D" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'") print $3}' | awk ...
...'{ if ($1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90}'`
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "D" && ...
...$1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3, $2}' | awk '{ if ...
...($1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ($1 >= 360) print $1 - 360; ...
...else print $1}'`
polarity=`cat focmec.lst | grep ${stat} | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 ...
...== "-" ) print $4}'`

if [ $polarity == "U" ]; then
echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gred -W -O -K >> focmec.ps
fi

#echo ${stat} ${azimut} ${takeoffmod}
#echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Si0.5c
#-Gblue -O -K >> focmec.ps

```

```

if [ $polarity == "D" ]; then
echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gwhite -W -O -K >> focmec.ps
fi

if [ $polarity == "-" ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} +" | pstext -JS0/-90/${size}c -R0/360/-90/0 ...
... -N -O -K >> focmec.ps
fi

done

#nuevo ciclo for para nombre de estaciones:
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
..print $1}'`; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == ...
.."D" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3}' | awk ...
...'{ if ($1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90-10}'`
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "D" ...
... && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3, $2}' | awk ...
...'{ if ($1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ($1 >= 360) print $1...
... - 360; else print $1+10}'`

#NOMBRE ESTACIONES:
if [ ${stat_name} == 1 ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} ${stat}" | pstext -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c ...
-F+f6,1,black -O -K >> focmec.ps
fi

done

#Texto encima: Strike, Dip, Rake:
#echo "-40 35 3 primeras y ultimas soluciones arrojadas por FOCMEC" | pstext
#-JS0/-90/${size}c -R0/360/-90/0 -N -O -K >> focmec.ps

#Y ahora encima de la pelota:
#echo "-60 35 ${strike} ${dip} ${rake}" | pstext -JS0/-90/${size}c ...
... -R0/360/-90/0 -N -O -K >> focmec.ps

#plot the centre as a cross
#echo 0 -90 | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -S+0.5c -O -K >> focmec.ps

#para colocar el numero de la solución:
#echo 0 -90 1 | pstext -JS0/-90/${size}c -R0/360/-90/0 -N -O -K >> focmec.ps

#Ya tengo una pelota, la llevaré a su rincón para intentar colocar las demás:

#####
##### SEGUNDA PELOTA #####
#####

#-X11 -Y19
#RECUERDA QUE EL BASEMAP SE SITÚA CON REFERENCIA AL ANTERIOR!! OJO CON -X -Y .
psbasemap -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -X-8 -YO -Bog0 -P -O -K >> focmec.ps

#PRIMERA SOLUCIÓN: NR==11 ; SEGUNDA SOLUCIÓN: NR==12 ; TERCERA SOLUCIÓN: NR==13

dip=`more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $1}'`
strike=`more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $2}'`
rake=`more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $3}'`

#-Sa is Aki/Richards format
#1,2: longitude, latitude of event (-: option interchanges order) 3: depth of
#event in kilometers 4,5,6: strike, dip and rake in degrees 7: magnitud 8,9:
#longitude, latitude at which to place beach ball.

psmeca -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sa${size}c -O -B -Gred -K << END >> focmec.ps

```

```

0 -90 0 ${strike} ${dip} ${rake} 5 0 0
END

#plot the station positions on the plot
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
...print $1}'`; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == ...
... "D" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3}' | awk ...
...'{ if ( $1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90}'`
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "D" && ...
...$1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3, $2}' | awk '{ if ...
...($1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ( $1 >= 360) print $1 - 360; ...
...else print $1}'`
polarity=`cat focmec.lst | grep ${stat} | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 ...
...== "-" ) print $4}'`

if [ $polarity == "U" ]; then
echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gred -W -0 -K >> focmec.ps
fi

#echo ${stat} ${azimut} ${takeoffmod}
#echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Si0.5c
#-Gblue -0 -K >> focmec.ps

if [ $polarity == "D" ]; then
echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gwhite -W -0 -K >> focmec.ps
fi

if [ $polarity == "-" ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} +" | pstext -JS0/-90/${size}c -R0/360/-90/0 ...
... -N -0 -K >> focmec.ps
fi

done

#nuevo ciclo for para nombre de estaciones:
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
...print $1}'`; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == ...
... "D" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3}' | awk ...
...'{ if ( $1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90-10}'`
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "D" ...
... && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3, $2}' | awk ...
...'{ if ( $1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ( $1 >= 360) print $1...
... - 360; else print $1+10}'`

#NOMBRE ESTACIONES:
if [ ${stat_name} == 1 ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} ${stat}" | pstext -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c ...
-F+f6,1,black -0 -K >> focmec.ps
fi

done

#Texto encima: Strike, Dip, Rake:
#echo "-40 35 3 primeras y ultimas soluciones arrojadas por FOCMEC" | pstext
#-JS0/-90/${size}c -R0/360/-90/0 -N -0 -K >> focmec.ps

#plot the centre as a cross
#echo 0 -90 | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -S+0.5c -0 -K >> focmec.ps

#numero de solución
#echo 0 -90 2 | pstext -JS0/-90/${size}c -R0/360/-90/0 -N -0 -K >> focmec.ps

```

```
#####
##### TERCERA PELOTA #####
#####

#create the stereographic projection.
psbasemap -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -X0 -Y-8 -B0g0 -P -0 -K >> focmec.ps

#PRIMERA SOLUCIÓN: NR==11 ; SEGUNDA SOLUCIÓN: NR==12 ; TERCERA SOLUCIÓN: NR==13

dip='more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $1}''
strike='more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $2}''
rake='more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $3}''

#-Sa is Aki/Richards format
#1,2: longitude, latitude of event (-: option interchanges order) 3: depth of
#event in kilometers 4,5,6: strike, dip and rake in degrees 7: magnitude 8,9:
#longitude, latitude at which to place beach ball.

psmecca -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sa${size}c -0 -B -Gred -K << END >> focmec.ps
0 -90 0 ${strike} ${dip} ${rake} 5 0 0
END

#plot the station positions on the plot
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
..print $1}'; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == ...
... "D" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3}' | awk ...
... '{ if ($1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90}'`
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "D" && ...
... $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3, $2}' | awk '{ if ...
... ($1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ($1 >= 360) print $1 - 360; ...
... else print $1}'`
polarity=`cat focmec.lst | grep ${stat} | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 ...
... == "-" ) print $4}'`

if [ $polarity == "U" ]; then
echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gred -W -0 -K >> focmec.ps
fi

#echo ${stat} ${azimut} ${takeoffmod}
#echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Si0.5c
#-Gblue -0 -K >> focmec.ps

if [ $polarity == "D" ]; then
echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gwhite -W -0 -K >> focmec.ps
fi

if [ $polarity == "-" ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} +" | pstext -JS0/-90/${size}c -R0/360/-90/0 ...
... -N -0 -K >> focmec.ps
fi

done

#nuevo ciclo for para nombre de estaciones:
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
..print $1}'; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == ...
... "D" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3}' | awk ...
... '{ if ($1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90-10}'`
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "D" ...
... && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3, $2}' | awk ...
... '{ if ($1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ($1 >= 360) print $1...`
```

```

... - 360; else print $1+10}'

#NOMBRE ESTACIONES:
if [ ${stat_name} == 1 ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} ${stat}" | pstext -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c ...
-F+f6,1,black -O -K >> focmec.ps
fi

done

#####
##### CUARTA PELOTA #####

#create the stereographic projection.
psbasemap -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -X8 -Y0 -B0g0 -P -O -K >> focmec.ps

#0jo que ahora consideramos la antepenúltima solución
antepen='more ${carpeta}.out | awk END'{print NR-2}'

dip='more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $1}'
strike='more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $2}'
rake='more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $3}'

#-Sa is Aki/Richards format
#1,2: longitude, latitude of event (-: option interchanges order) 3: depth of
#event in kilometers 4,5,6: strike, dip and rake in degrees 7: magnitude 8,9:
#longitude, latitude at which to place beach ball.

psmeqa -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sa${size}c -O -B -Gred -K << END >> focmec.ps
0 -90 0 ${strike} ${dip} ${rake} 5 0 0
END

#plot the station positions on the plot
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
...print $1}'`; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "${stat}" || $4 == ...
... "D" && $1 == "${stat}" || $4 == "-" && $1 == "${stat}") print $3}' | awk ...
... '{ if ($1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90}'
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "${stat}" || $4 == "D" && ...
... $1 == "${stat}" || $4 == "-" && $1 == "${stat}" ) print $3, $2}' | awk '{ if ...
... ($1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ($1 >= 360) print $1 - 360; ...
...else print $1}'
polarity=`cat focmec.lst | grep ${stat} | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 ...
...== "-" ) print $4}'

if [ $polarity == "U" ]; then
echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gred -W -O -K >> focmec.ps
fi

#echo ${stat} ${azimut} ${takeoffmod}
#echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Si0.5c
#-Gblue -O -K >> focmec.ps

if [ $polarity == "D" ]; then
echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gwhite -W -O -K >> focmec.ps
fi

if [ $polarity == "-" ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} +" | pstext -JS0/-90/${size}c -R0/360/-90/0 ...
... -N -O -K >> focmec.ps
fi

done

```

```

#nuevo ciclo for para nombre de estaciones:
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
...print $1}'`; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == ...
... "D" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3}' | awk ...
... '{ if ( $1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90-10}'`
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "D" ...
... && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3, $2}' | awk ...
... '{ if ( $1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ( $1 >= 360) print $1...
... - 360; else print $1+10}'`

#NOMBRE ESTACIONES:
if [ ${stat_name} == 1 ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} ${stat}" | pstext -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c ...
-F+f6,1,black -O -K >> focmec.ps
fi

done
#####
##### QUINTA PELOTA #####
#####

#create the stereographic projection.
psbasemap -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -X-8 -Y-8 -B0g0 -P -O -K >> focmec.ps

#Ojo que ahora consideramos la penúltima solución
pen=`more ${carpeta}.out | awk END '{print NR-1}'`

dip=`more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $1}'`
strike=`more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $2}'`
rake=`more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $3}'`

#-Sa is Aki/Richards format
#1,2: longitude, latitude of event (-: option interchanges order) 3: depth of
#event in kilometers 4,5,6: strike, dip and rake in degrees 7: magnitude 8,9:
#longitude, latitude at which to place beach ball.

psmeca -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sa${size}c -O -B -Gred -K << END >> focmec.ps
0 -90 0 ${strike} ${dip} ${rake} 5 0 0
END

#plot the station positions on the plot
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
...print $1}'`; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == ...
... "D" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3}' | awk ...
... '{ if ( $1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90}'`
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "D" && ...
... $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3, $2}' | awk '{ if ...
... ($1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ( $1 >= 360) print $1 - 360; ...
... else print $1}'`
polarity=`cat focmec.lst | grep ${stat} | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 ...
... == "-" ) print $4}'`

if [ $polarity == "U" ]; then
echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gred -W -O -K >> focmec.ps
fi

#echo ${stat} ${azimut} ${takeoffmod}
#echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Si0.5c
#-Gblue -O -K >> focmec.ps

if [ $polarity == "D" ]; then
echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gwhite -W -O -K >> focmec.ps
fi

```

```

if [ $polarity == "-" ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} +" | pstext -JS0/-90/${size}c -R0/360/-90/0 ...
... -N -0 -K >> focmec.ps
fi

done

#nuevo ciclo for para nombre de estaciones:
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
...print $1}'`; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == ...
... "D" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3}' | awk ...
...'{ if ($1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90-10}'`
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "D" ...
... && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3, $2}' | awk ...
...'{ if ($1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ($1 >= 360) print $1...
... - 360; else print $1+10}'`

#NOMBRE ESTACIONES:
if [ ${stat_name} == 1 ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} ${stat}" | pstext -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c ...
-F+f6,1,black -0 -K >> focmec.ps
fi

done

#####
##### SEXTA PELOTA #####
#####

#create the stereographic projection.
psbasemap -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -X8 -Y0 -B0g0 -P -0 -K >> focmec.ps

#0jo que ahora consideramos la penúltima solución
ul=`more ${carpeta}.out | awk END'{print NR}'`

dip=`more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $1}'`
strike=`more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $2}'`
rake=`more temp1.dat | awk '{if (NR==1) print $3}'`

#-Sa is Aki/Richards format
#1,2: longitude, latitude of event (-: option interchanges order) 3: depth of
#event in kilometers 4,5,6: strike, dip and rake in degrees 7: magnitude 8,9:
#longitude, latitude at which to place beach ball.

psmeca -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sa${size}c -0 -B -Gred -K << END >> focmec.ps
0 -90 0 ${strike} ${dip} ${rake} 5 0 0
END

#plot the station positions on the plot
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
...print $1}'`; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == ...
... "D" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3}' | awk ...
...'{ if ($1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90}'`
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "D" && ...
... $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3, $2}' | awk '{ if ...
...($1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ($1 >= 360) print $1 - 360; ...
...else print $1}'`
polarity=`cat focmec.lst | grep ${stat} | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 ...
...== "-" ) print $4}'`

if [ $polarity == "U" ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gred -W -0 -K >> focmec.ps

```

```

fi

#echo ${stat} ${azimut} ${takeoffmod}
#echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Si0.5c
#-Gblue -O -K >> focmec.ps

if [ $polarity == "D" ]; then
echo ${azimut} ${takeoffmod} | psxy -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c -Sc0.3c ...
... -Gwhite -W -O -K >> focmec.ps
fi

if [ $polarity == "-" ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} +" | pstext -JS0/-90/${size}c -R0/360/-90/0 ...
... -N -O -K >> focmec.ps
fi

done

#nuevo ciclo for para nombre de estaciones:
for stat in `cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" || $4 == "D" || $4 == "-" ) ...
..print $1}'`; do
takeoffmod=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == ...
... "D" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3}' | awk ...
... '{ if ($1 > 90) print 180-$1; else print $1}' | awk '{print $1-90-10}'`
azimut=`cat focmec.lst | awk '{ if ( $4 == "U" && $1 == "'${stat}'" || $4 == "D" ...
... && $1 == "'${stat}'" || $4 == "-" && $1 == "'${stat}'" ) print $3, $2}' | awk ...
... '{ if ($1 > 90) print $2+180; else print $2}' | awk '{ if ($1 >= 360) print $1...
... - 360; else print $1+10}'`

#NOMBRE ESTACIONES:
if [ ${stat_name} == 1 ]; then
echo "${azimut} ${takeoffmod} ${stat}" | pstext -R0/360/-90/0 -JS0/-90/${size}c ...
-F+f6,1,black -O -K >> focmec.ps
fi

done

rm focmec.pdf temp1.dat
ps2pdf focmec.ps focmec.pdf
rm focmec.ps

echo ' '
echo "Imagen focmec.pdf creado en carpeta del evento."
echo ' '
echo 'Pulsa ENTER para continuar'
read pause
echo ' '
atril *df

cd ..

done

```